“十二五”普通高等教育本科规划教材



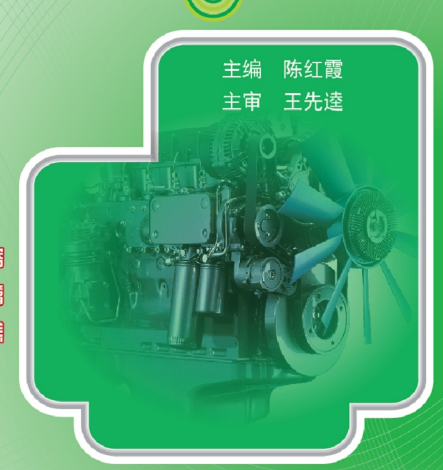
全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

机械制造工艺学

（第2版）

主编　陈红霞

主审　王先逵



据最新教学要求和行业标准更新内容

编写风格新颖活泼，每章均有引例开篇

强化案例性教学，强调应用能力的培养





内 容 简 介

本书重点介绍制订机械制造工艺过程中的相关原理、方法。其内容涵盖机械加工工艺规程的制订、机械加工精度、机械加工表面质量、提高劳动生产率的途径、装配工艺基础、尺寸链、机床夹具简介、典型零件加工等章节。全书均采用新国标，授课学时为50～70学时。

本书内容精炼，叙述简明，理论联系实际，深入浅出，注重案例分析和实际操作性。本书不仅可作为高等工科院校机械类专业或近机械类专业的教材和参考书，也可供工厂、科研院所从事机械制造业的工程技术人员参考和培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造工艺学/陈红霞主编. —2版. —北京：北京大学出版社，2014.1

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-23726-7

Ⅰ. ①机… Ⅱ. ①陈… Ⅲ. ①机械制造工艺—高等学校—教材 Ⅳ. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第008880号

书　　名：机械制造工艺学(第2版)

著作责任者：陈红霞　主编

策 划 编 辑：童君鑫

责 任 编 辑：宋亚玲

标 准 书 号：ISBN 978-7-301-23726-7/TH・0380

出 版 发 行：北京大学出版社

地　　址：北京市海淀区成府路205号　100871

网　　址：http://www.pup.cn　新浪官方微博：@北京大学出版社

电 子 信 箱：pup_6@163.com

电　　话：邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962

印　刷　者：

经　销　者：新华书店

787毫米×1092毫米　16开本　22.75印张　528千字

2010年7月第1版

2014年1月第2版　2014年1月第1次印刷

定　　价：45.00元

第 2 版前言

随着科学技术的迅猛发展，传统的制造技术目前已进入现代制造技术的新阶段。先进制造技术的核心是先进的制造工艺技术，机械制造工艺学是现代制造技术的主要基础。所以，机械制造工艺学如何适应科技发展的需要，进行内容的变更，就成为一个亟待解决的问题。

本书是在第 1 版基础上，做了相应的修改并根据教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导委员会机械学科教材的编写要求，为机械类专业或近机械类专业开设的“机械制造工艺学”课程而撰写的教学用书。为了更好地实现创新型应用人才培养的目标，全书参考了许多兄弟院校近年来所出版的教材，并在体系、内容等方面都作了较大的变动，归纳起来，有以下主要特点：

(1) 编写体例新颖活泼，每章均由引例开头，引导学生进入每章的学习，增强教材的可读性，改变工科教材艰深古板的固有面貌。

(2) 注重前后相关知识的关联性。学习和借鉴优秀教材的写作思路、写作方法以及章节安排。在保证基本内容的基础上，删减了过时的旧内容，扩充了现代制造技术的新知识，将机床夹具设计内容融入机械制造工艺中，使二者有机地结合；将机械制造工艺的最新的技术和未来发展趋势等内容增加到相关的知识链接中介绍给学生。在介绍某些重点、难点时点明知识点与其他课程的关联性，让学生清楚机械制造工艺学的重要地位，以引起学生的兴趣。

(3) 强化案例式教学，强调应用性和能力的培养。以学生就业所需的专业知识和操作技能为着眼点，在适度的基础知识与理论体系覆盖下，着重讲解应用型人才培养所需的内容和关键点。在编写过程中有机融入大量的实例以及操作性较强的案例，并对实例进行有效的分析，提高教材的可读性，突出实用性和可操作性，以适应创新型应用人才培养的需要。

(4) 以学生为本，坚持理论联系实际。每章后都附有一定的思考题、习题，引导思维、掌握要点，培养学生综合分析问题和解决问题的能力。

本书内容共分 8 章：第 1 章机械加工工艺规程制定；第 2 章机械加工精度；第 3 章机械加工表面质量；第 4 章提高劳动生产率的途径；第 5 章装配工艺基础；第 6 章尺寸链；第 7 章机床夹具简介；第 8 章典型零件加工。

本书除作为高等工科院校机械类专业或近机械类专业的教材，也可作为职业大学、电视大学、职工大学、函授大学和自学考试等学生的教材，并可供从事机械制造业的工程技术人员参考和培训使用。

本书由内蒙古工业大学机械学院陈红霞副教授任主编、河南农业大学机电工程学院刘军教授任副主编、清华大学王先逵教授主审。其他分工如下：绪论、第 1 章、第 6 章由陈红霞编写；第 2 章、第 3 章、第 7 章、第 8 章由河南农业大学机电工程学院刘军和李建伟共同编写；第 4 章、第 5 章由中国人民解放军装甲兵技术学院机械系王晓昱编写。

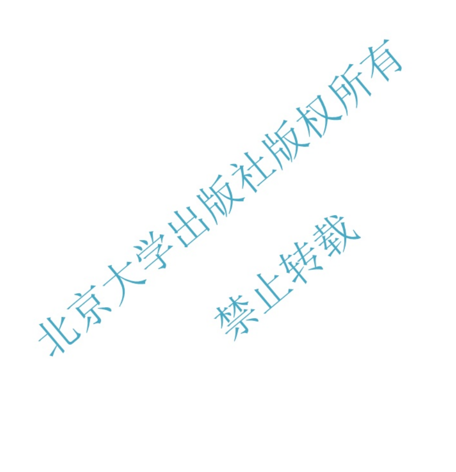
本书在编写过程中得到了北京大学出版社和一些兄弟院校的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编　者

2013 年 12 月

目　　录


北京大学出版社版权所有
禁止转载

绪　论

1．我国机械制造业的现状及发展趋势

机械制造业是指从事各种动力机械、起重运输机械、农业机械、冶金矿山机械、化工机械、纺织机械及其他机械设备生产的行业。机械制造业是整个国民经济和国防建设的基础性、支柱性产业，是其他高新技术产业发展的重要载体和平台，其发展水平体现了一个国家的工业化水平和综合国力，是各行各业实现结构升级和技术进步的关键保证。

当今，机械制造业已经成为我国工业中具有相当规模和一定技术基础的最大产业之一。回首新中国成立后近 65 年的发展历程，机械制造业的发展可以分为 4 个阶段：20 世纪 50 年代主要从苏联和东欧国家大量引进成套设备和技术，建设了一批机械工业基地，奠定了中国机械工业与机械科技发展的基础；60 年代，技术引进转向日本、西欧等资本主义国家，由于受到了国内外政治气候的影响，技术引进规模较小，进展迟缓；70 年代，技术引进扩大到整个西方国家，出现了两次进口成套设备的高潮，带有一定程度的盲目性；改革开放以来，我国机械制造业实力和国际地位都有了明显提升，机械技术引进和发展进入了全方位、多形式、多层次的新的历史时期。尤其是进入 21 世纪以来，机械制造业从产品研发、技术装备和加工能力等方面都取得了很大的进步。2000 年到 2010 年，全行业工业总产值从 1.44 万亿元增长到 14.38 万亿元，年均增速高达 25%以上；规模以上企业数从 3.36 万家增加到 10 万多家；资产规模从 1.96 万亿元增长到 10.4 万亿元；工业增加值占全国工业的比重从 9.2%大幅提升至 19%左右，占 GDP 的比重从 3.7%提高到 9%左右。而在“十一五”期间，机械工业的产业规模持续快速增长。2010 年机械工业增加值占全国 GDP 的比重已超过 9%；工业总产值从 2005 年的 4 万亿元增长到 2010 年的 14 万亿元，年均增速超过 25%；规模以上企业已达 10 万多家，比“十五”末增加了近 5 万家，从业人数达到 1752 万人，资产总额已达到 10.4 万亿元，比“十五”末翻了一番。2009 年，我国机械工业销售额达到 1.5 万亿美元，超过日本的 1.2 万亿美元和美国的 1 万亿美元，成为全球机械制造第一大国。2009 年以后有越来越多的产品向世界最高等级冲击：在重大技术装备中，1.6 万吨级水压机、60 立方米电铲，1.2 万米全数字化交流变频特深井陆地石油钻机、16500 吨的自由锻造油压机、7.63 米焦炉机械、1600 毫米以上大型板坯连铸机等一大批具有世界水平的重大装备研制成功。一批具有世界级水平的基础装备的开发也接连取得突破，例如，三一集团生产的数控刮削辊光机(DR3030)属于深孔加工类机床，采用的是德国进口组合刀具一次性完成对油缸钢筒内孔粗镗、刮削和辊光加工的高效深孔加工设备，填补了国内外市场空白；2011 年，柳工自主研发、代表行业领先技术水平的第五代 E 系列挖掘机产品 CLG922E 和 945E 首次在本届北京展上展出，E 系列产品是柳工依靠自身的技术力量研发的新型产品，最大技术特点是安全环保，可靠高效。同时，在“十二五”的初期，有一大批新兴高尖端产品正在紧锣密鼓的研发中，我国的机械产品在国内外市场上的竞争力也在不断地增强。

虽说已经取得了这样骄人的成绩，但业内企业依然要冷静的面对中国机械制造行业目前存在的突出问题：

(1) 自主创新能力较为薄弱。我国机械工业的产业规模虽已位居世界首位，但目前高端装备仍满足不了需要，不得不大量进口。行业中低端产能过剩、高端严重不足的矛盾非常突出，造成了高端产品供不应求，低端产品供大于求的现象。之所以如此，原因就在于自主创新能力薄弱，无法有效地支撑产品升级。多年来，相当多的企业过分看重当期发展速度，追求短平快，重当前、轻长远；重制造、轻研发；重引进、轻消化；重硬件、轻软件；重物质、轻人才。从而导致研发投入严重不足，研发条件普遍落后，研发经验缺乏积累。尤其是广大中小企业缺乏公共技术服务平台的支撑，技术创新更是心有余而力不足。

(2) 基础发展相对滞后。与快速发展的主机产品相比，基础零部件及优质专用材料、自控系统和测试仪器、数控机床和基础制造装备的发展明显滞后，已成为影响机械产品向高端升级的三大瓶颈。尤其是基础零部件，不但产品水平差距大，而且至今尚未引起各方面足够重视。

(3) 现代制造服务业发展缓慢。机械工业的产业结构调整虽已有一定进展，但总体看来产业结构不合理现象仍然较为严重。传统加工制造业比重过大，现代制造服务业比重过低；对实物产品生产的依赖过大，而服务增值在行业总产出中的贡献度过低；从实物产量看，与工业发达国家相比，我国许多机械产品的产量已高居世界前列，但从全行业的销售额看，尤其是从经济效益看，这一优势并不明显。其中原因，除了产品档次差距的影响外，服务性增值方面的巨大差距是主要原因。“十一五”机械工业的高速发展主要得益于实物产品需求的高速增长，随着我国工业化进程向中后期的演进，继续期望依靠实物产品产量的高速增长支撑今后的行业发展已越来越不现实，因此尽快补强现代制造服务业这一短腿已成当务之急。

(4) 产业发展方式较为粗放。我国机械工业持续快速发展的良好态势并不能掩盖发展方式粗放的问题。重速度、轻质量；重规模、轻效益；重当前、轻长远的倾向虽已引起越来越多的关注，但尚未得到根本改变。行业的快速发展仍以过多的资源消耗为代价，生产效率和经营效益与工业发达国家同行相比差距明显。行业投资强度大增，但外延扩张之风盛行、重复建设严重，产业集中度低、地区结构趋同，核心竞争力弱，生产效率和经济效益差，在国际分工中处于明显不利地位。我国机械工业单位产出综合能耗与工业发达国家相比有较大差距，突出表现在热加工工艺环节上。例如，我国铸造行业每生产一吨铸铁件能耗为0.4~0.5吨标准煤，国外先进水平为0.20~0.30吨标准煤；我国锻造行业每吨锻件平均能耗约为0.88吨标准煤，日本仅为0.52吨标准煤；我国热处理行业平均每吨工件热处理能耗为660千瓦时，美国、日本、欧盟等发达国家平均能耗在450千瓦时以下；国产电炉炼钢平均每吨钢总能耗为800~1000千瓦时，国外先进水平为550~600千瓦时。粗放的发展方式导致我国机械工业的经营效益偏低。我国机械工业增加值率在24%~26%，而发达国家在30%以上；销售收入利润率也只有6%左右。

针对上述问题，我国政府不断出台相关政策，促进行业发展。在国家的“十二五”机械工业发展总体规划中，更是明确提出：21世纪的第二个十年，我国机械工业要在头十年高速发展的基础上更加注重提高发展质量，将发展目标定位于由机械制造大国转变为机械制造强国。2020年，到我国全面建设小康社会奋斗目标实现之时，我国机械工业将基本实现高端装备的产业化，基础滞后主机的局面基本改观，自主创新能力大幅提高，国际竞争力接近工业发达国家水平。为此，在“十二五”期间，我国将重点实施：主攻高端战略、

创新驱动战略、强化基础战略、两化融合战略、绿色为先等战略，真正实现以下发展目标：

(1) 2015 年发展目标。

一是保持平稳健康发展；二是产业向高端升级有所突破；三是自主创新能力明显增强；四是产业基础初步夯实；五是“两化融合”水平显著提高；六是推进绿色制造。

(2) 2020 年发展目标。

我国机械工业步入世界强国之列，在国际竞争中处于优势地位，主要标志为：主要产品的国际市场占有率处于世界前三位；基本掌握了主导产品的核心技术，拥有一批具有自主知识产权的关键产品和知名品牌；重点行业的排头兵企业进入世界前三强之列。

2. 当前机械制造工艺的主要任务

机械制造业是一切制造业之母。只有机械制造业本身的设备技术、基础零部件质量提高了，才有可能制造出为其他行业服务的各种高质量的设备和零部件，才能制造出高质量的各种产品。“机械制造，工艺为本”。任何先进的产品设计，都要通过工艺来保证。工艺水平不够，就不可能生产出有生命力的、高质量的产品，这是通过对机械制造工业发展的分析，对机械制造过程的实践经验总结出的一条重要规律。只有充分认识这一规律，抓住机机械制造工艺这一根本不放，才能使我国机械工业在国内外市场竞争中以雄厚的企业工艺实力和应变能力，以质优价廉的产品尽快地立足于胜利者的行列。

我国机械工业各部门间的工艺水平差别比较大，当前机械制造工艺工作需要加强的方面是：

(1) 提高产品质量。提高产品零部件的加工精度和装配精度，是提高产品性能指标和使用可靠性的基本手段。现在的情况是，不少产品的质量，就设备条件和技术水平来说是完全可以满足精度要求的，但往往由于工艺混乱或执行不力而严重影响质量，甚至造成事故。因此对很多企业，如何加强工艺管理工作，完善工艺文件，严格执行工艺纪律，仍是一项有待切实做好的重要工作。

(2) 不断开发新技术。以信息技术为代表的现代科学技术的发展对机械制造工艺提出了更高、更新的要求，更加凸现了机械制造业作为高新技术产业化载体在推动整个社会技术进步和产业升级中不可替代的基础作用。针对械制造行业不少企业的生产技术比较陈旧，新工艺、新材料的开发应用迟缓，热加工工艺落后的局面，企业必须不断开发新的机械制造工艺技术，具备较强的科研开发和产品创新能力，及时调整产品结构，推动产品更新换代，从而应对市场需求的变化，使机械制造工艺技术伴随高新技术和新兴产业的发展而共同进步，并充分体现先进制造技术向智能化、柔性化、网络化、精密化、绿色化和全球化方向发展的总趋势和时代特征，使企业保持勃勃生机。

(3) 提高生产专业化水平。就目前本行业多数企业来说，生产专业化仍是提高劳动生产率和经济效益的有效途径。专业化生产可以采用较先进的专用装置，充分发挥操作人员和设备的潜力。企业的多品种产品生产，也应置于高技术的基础上，应尽快改善企业“大而全、小而全”的状况，中小企业与大型企业间应努力形成进行专业化协作的产业组织结构：行业内大、中、小企业在市场中的站位层次分明，大的企业集团大而强，从事规模化经营，小的企业小而专，以大企业为中心搞专业化配套，形成以大带小、以小促大的战略格局。

(4) 节约材料降低成本。产品生产的经济效益是企业的重要目标，从工艺上采取措施以降低成本是一个主要方面。例如提高热加工技术能节省大量材料和减少加工工时；提高产品的“三化”水平(产品系列化、部件通用化、零件标准化)，能大幅度降低生产成本。目前，采取各种技术措施来节约材料和能源消耗，提高经济效益，是有很大潜力的。

3．机械制造工艺学课程的主要内容

任何一台机械产品都是由零件所组成，机械零用如轴、套、箱体、活塞、连杆、齿轮、螺杆、凸轮等，都来自不同材料经热加工制成的毛坯，经过机械加工(冷加工)达到图样规定的结构几何形状和质量要求，然后经过组件、部件和机器装配而满足产品的性能要求。各种机械产品的用途和零件结构的差别虽然很大，但它们的制造工艺却有共同之处。从传统的专业划分来说，机械制造工艺学所研究的对象主要是机械零件的冷加工和装配工艺中具有共同性的规律。工艺工作对发展品种、保证和提高产品质量、提高生产率、节约能源和降低原材料梢耗、取得更大的技术经济效益以及改善企业管理有着十分密切的关系。要解决好机械制造工艺问题，可以提纲挈领地说应从“优质、高产、低消耗”(即质量、生产率、经济性)三个方面的指标来衡量。

围绕机械制造工艺问题的三个指标，在本课程中安排相应的教学内容是必要的。

首先是加工质量。没有质量就没有数量，也就谈不到生产率和经济性。考虑加工质量首先涉及加工各种零件的质量保证问题。为此，编者在第1章中安排机械加工工艺规程如何制定的内容，阐明编制工艺规程的原则、步骤和方法，介绍工艺部门在完成一台机械的零件加工工艺过程的全面分析和方案比较、抉择以后，如何以工艺文件(卡片)的方式填写下来，供生产准备和车间实施之用。

从满足产品性能和耐用性而提出的零件加工质量要求有两个方面：加工精度和加工表面质量。前者包括了零件的尺寸精度、形状精度和相互位置精度，后者包括了零件表面的粗糙度、波度和物理、机械性能。规定零件的加工质量是产品设计人员的任务，而在最低成本下达到要求则是工艺人员的职责。随着科学技术的发展和国际市场竞争的白热化，以及采用国际标准的迫切性，我国机械工业对零件的加工质量要求也越来越高。因此，必须深入研究在加工过程中各种误差因素对加工质量影响的规律，同时需要通过大量的科学实验和生产实践，采用新工艺和改进工艺装备等措施来保证。在质量第一的方针指导下，加工精度和表面质量就成为本课程中很重要的第2、3章内容。

其次，机械加工工艺中另两个指标是要求生产时消耗的物质、能源和劳动量要尽量地少，也就是生产率要高，生产成本要低，这就需要对多种工艺过程方案进行分析和比较，考虑在生产实践中如何提高劳动生产率，为此在第4章中安排的内容是提高劳动生产率的途径。

机械零件的装配是整个机械制造过程中的最后一个阶段，它包括了安装、调整、检验和试车等环节。近年来，在毛坯制造和机械加工方面实现了高度机械化和自动化以及新的工艺方法，大大地节省了人力和费用。相形之下装配工作在整台机械制造中的比重日益增大，所以装配工艺中同样存在着质量、生产率和经济性的指标要求，因此本书第5章的内容是装配工艺基础知识，系统介绍选择不同的装配工艺方法和制定装配工艺规程时如何体现质量、生产率和经济性的要求。

为了保证机器或仪器能顺利的进行装配，并达到预定的工作要求，要在设计与生产过程中，正确分析和确定各零部件尺寸关系，合理确定构成各有关零部件的几何精度(尺寸精度、形状和位置精度)，它们之间的关系需用尺寸链来计算和处理，所以在第6章中介绍如何运用尺寸链来保证零件加工和装配中的加工精度。

夹具是保证产品质量、提高劳动生产率及减轻工人劳动强度的重要工艺装备。考虑到夹具与机械制造工艺的关联性，在本书第7章中简明扼要地叙述了机床夹具的定位、夹紧原理、定位件与夹紧机构的设计原则，以及各种典型夹具的结构、设计方法等内容，让学生了解夹具的知识，为制定工艺规程时进行夹具的设计奠定基础。

机械制造工艺学所涉及的零件品种虽成千上万，但在教材中不可能也不需要一一罗列，为此选取了几种量大、面广且具有使用各种加工方法和有代表性的零件加工为典型，于是构成本书第8章内容：通过一些常见的典型零件的机械加工工艺的例子，传授思考办法、分析途径和决策要点，使读者能举一反三，触类旁通，培养分析问题、解决问题的能力。

4. 机械制造工艺学课程的学习方法

机械制造工艺学是一门综合性的实用技术学科。在我国首次于1953年由苏联专家节门杰夫教授在清华大学正式讲授，经过我国学者多年来努力，内容不断充实和发展。

课程的特点可以归纳为以下几方面：

(1) 机械制造工艺学是一门专业课，它与基础课和技术基础课不同、随着科学技术和经济的发展，课程在理论上和体系上正在不断完善和提高。

(2) 由于制造工艺是非常复杂的，影响因素很多，课程中所讲述的工艺的概念、理论、方法等都是来自生产和工艺科研的实践，所以课程的实践性很强，与生产实际的联系十分密切，有实践知识才能在学习时理解得比较深入和透彻。因此要注意和实际结合，注意培养综合分析问题的能力，这样才能将有关理论和方法，正确应用于生产实践，积累实际经验。

(3) 课程具有工程性，有不少设计方法方面的内容，需要从工程应用的角度去理解和把握。因为工程问题和理论问题是有差别的。必须要实事求是，根据具体情况作出具体分析。

(4) 掌握课程的内容要有习题、课程设计、实验、实习等各环节的相互配合才能解决，每个环节都是重要的，不可缺少的，各教学环节之间应密切结合和有机联系，形成一个整体。要重视与课程有关的各教学环节的学习，使之产生相辅相成的效果。

(5) 涉及面广，内容丰富。工艺不仅涉及机械加工和装配，还涉及毛坯制造和热处理；不仅涉及加工方法，还涉及加工设备及工艺装备；不仅涉及物质的流动和变化，还涉及控制物质流的信息流；不仅涉及制造技术，还涉及管理技术。因而，要善于综合运用已学过的金属工艺学、金属材料及热处理、互换性与技术测量、金属切削原理及刀具、金属切削机床、测试技术、计算机应用技术和企业管理等课程的知识，具备制订机械加工工艺规程及设计机床夹具的能力。

工艺是机械制造之本。因此，作为机械制造专业的学生与技术人员就应具有强烈的责任感与自豪感。机械制造工艺学还没打达到完美的境地，许多工艺规律需要我们去探索，许多理论空白需要我们去填补，许多新的工艺方法需要我们去研究与开发。如何将现代科学理论的成果、现代技术的发展与机械制造结合起来，是摆在每一个机械制造工程技术人员面前的一个很值得研究的课题。

第 1 章　机械加工工艺规程制订

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握机械加工工艺过程的组成	生产过程、工艺工程、工序、工步、工位、安装、走刀的概念	10%	
了解生产类型的划分及各生产类型的特点	零件生产纲领，单件生产，成批生产，大量生产	5%	
掌握制定机械加工工艺规程的原始资料及步骤	制订工艺规程的基本原则；制定工艺规程的原始资料及步骤	10%	
了解工艺分析及毛坯选择原则	零件结构工艺性，毛坯选择原则	5%	
了解基准的分类，掌握粗、精基准选择原则	设计基准，工艺基准；粗基准选择原则；精基准选择原则	15%	
掌握工艺路线的拟定方法	加工方法的选择；加工阶段的划分；工序的集中与分散；加工顺序安排	25%	
掌握影响加工余量大小的因素及确定加工余量的方法	加工余量；工序余量影响因素；工序余量确定方法	10%	
掌握时间定额的组成和各部分的含义	时间定额组成	10%	
了解工艺过程的技术经济性分析	工艺成本	10%	

引例

“世界年度发动机”大奖评选创立以来，BMW M5 和 M6 配备的高性能 V10 发动机是唯一连续两次成功入选的发动机。在斯图加特，全球近 60 位权威行业记者一致评选 V10 发动机为“2006 世界年度发动机”。此外，它还赢得了令人垂涎的“2006 最佳高性能发动机”大奖，在 4.0 升以上级别中名列榜首。最佳高性能发动机的产生，取决于其优秀的发动机制造工艺。

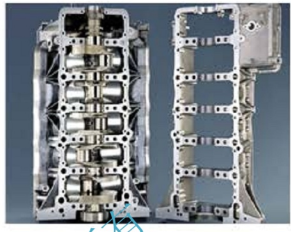
发动机对于汽车的重要性不言而喻，V10 发动机由机体组、曲柄连杆机构、配气机构、供油及燃油分配系统、电子传感器、点火系统和润滑系统以及散热系统等方面组成。它们各司其职综合在一起最终保证了 BMW 发动机运转所必需的三要素：可燃混合气、电火花和汽缸压力。

(1) 机体组：对于一款四冲程发动机来说，一般情况下机体组由上到下可分为 5 块，分别是气门室盖、汽缸盖、缸体、曲轴箱和油底壳。根据工作压力和使用车辆成本的不同，材料主要选择铸铁、铝合金以及镁铝合金。其中铸铁的硬度较强，适用于涡轮增压车型，

但散热效果差，所以往往都将压缩比设计得较低。铝合金重量轻，散热好，但硬度不强，主要用于高转的自然吸气车型。



宝马 M5 的 V10 发动机零件一览



V10 发动机曲轴箱主体

(2) 曲柄连杆机构：所谓曲柄连杆机构实际上就是通常所说的曲轴、连杆、活塞、活塞环、大小瓦。这些部件的作用就是用来将可燃混合气被点燃后爆发出的力量传递到离合器和变速箱中，根据发动机用途(强调马力输出或相对更低的油耗)来设计不同质量和惯性的曲轴及曲柄。另外，机体组中和曲柄连杆机构的相互设计配合也往往决定了一款发动机的转速高低。一般来说，大缸径短冲程时的设计主要是为了更加追求转速高，功率大。而小缸径长冲程式的设计则多用来载重或者纯正越野车等需要强调低转大扭矩的车。

(3) 配气机构：配气机构的主要作用就是根据发动机的实时需要而提供相应的可燃混合气。它由两方面组成，其中发动机内部主要包括正时皮带(优点是噪声小，缺点是需要更换)或正时链条(优点是免于更换，但十万公里左右要调整松紧度，缺点是噪声大)或正时齿轮(优点是不用更换，不用维护，缺点是重量大、惯性大)，凸轮轴、液压气门顶、气门、气门弹簧以及气门油封。它们之间的相互关系就是曲轴旋转的力通过正时皮带传送到凸轮轴，然后再由凸轮轴带动气门进行上下运动。除上述部件外，在发动机的外部还有一些为了配气的最终目的而工作的部件，按照从外到里的安装先后顺序分别是：空滤、空气流量计、进气温度传感器、节气门、进气歧管等。





汇集各缸输出动力的曲轴



V10 发动机凸轮轴

(4) 供油及燃油分配系统：汽油从油箱进入到汽缸中进行燃烧来产生动力。在这个过程中，汽车各部件间的相互配合是非常重要的。简单来说，就是行车电脑根据许许多多的

传感器(进气温度、空气流量、节气门开度、水温传感、爆震传感、氧传感、曲轴转速、挡位和发动机负荷等)来不断地调整喷油时机和喷油量。

(5) 电子传感器：需要传感器来不断反馈相关信息。

(6) 点火系统：点火系统的部件主要包括：电瓶、点火开关、行车电脑、分电器、点火线圈、缸线以及火花塞。这套系统的主要作用就是将电瓶里的低压电被放大到数万伏后通过分电器来不断地在每一个汽缸中点燃混合气。

(7) 润滑系统：四冲程发动机的内部润滑主要有两种方式，分别是压力润滑和飞溅润滑。前者主要通过机油泵将机油源源不断地输送到凸轮轴、活塞底部、瓦片等地方，而飞溅润滑的意思就是通过曲轴的旋转将机油甩出，目的是让缸桶内形成油膜，来进行润滑。

组成发动机的各种机械产品的生产过程内容十分广泛。从产品开发、生产和技术设备到毛坯制造、机械加工和装配，影响的因素和涉及的问题多而复杂。V10发动机的所有零部件毛坯需要利用切削加工、磨削加工、电加工、超声波加工、电子束及离子束加工等机械、电的加工方法，直接改变毛坯的形状、尺寸、相对位置和性能等，使其转变为合格零件。为了便于组织生产，部分零部件的生产往往分散在若干个专业化工厂进行，最后由发动机厂完成关键零部件和配套件的生产，并装配成完整的发动机。即按照专业化生产的方式组织生产，提高零部件的标准化、通用化和产品的系列化，从而能在保证质量的前提下，提高劳动生产率和降低成本。

1.1　机械加工工艺过程的基本概念

1.1.1　生产过程和工艺过程

1. 生产过程的概念

制造机械产品时，由原材料转变成成品的各个相互关联的整个过程称为生产过程，它包括以下几点。

(1) 原材料、半成品的运输保存。

(2) 生产技术准备工作。

(3) 毛坯制造：如铸造、锻造、冲压和焊接等。

(4) 零件的机械加工、热处理和其他表面处理等。

(5) 部件和产品的装配、调整、检验、试验、油漆和包装等。

由于机械产品的用途、复杂程度和生产数量不同，其生产过程多种多样。为了便于组织生产、提高劳动生产率和降低成本，通常将比较复杂的机器生产过程分散在若干个工厂中进行毛坯制造和零部件的加工，最后集中在一个工厂里装配成完整的机器。这样安排生产过程，除了较经济之外，还能使各个工厂按其产品的不同而专业化起来。例如，冶金工厂、铸造工厂、专门制造紧固零件(螺钉、螺母等)的工厂、专门制造化油器的工厂和电机制造厂等。一个汽车制造厂就要利用许多其他工厂的成品(玻璃、电气设备、轮胎、仪表等)来完成整个汽车的生产过程。其他如拖拉机制造厂、机床制造厂等，都是如此。这时，某工厂所用的原材料、半成品或部件，却是另一些工厂的成品。

根据机械产品的复杂程度的不同，工厂的生产过程又可按车间分为若干车间的生产过程。某一车间的原材料或半成品可能是另一车间的成品；而它的成品又可能是其他车间的

原材料或半成品。例如，锻造车间的成品是机械加工车间的原材料或半成品；机械加工车间的成品又是装配车间的原材料或半成品等。

为了使工厂具有较强的应变能力和竞争能力，现代工厂逐步用系统的观点看待生产过程的各个环节及它们之间的关系。即将生产过程看成一个具有输入和输出的生产系统。用系统工程学的原理和方法组织生产和指导生产，能使工厂的生产和管理科学化，能使工厂按照市场动态及时地改进和调节生产，不断更新产品以满足社会的需要，能使生产的产品质量更好、周期更短、成本更低。

2. 工艺过程

工艺过程是指在生产过程中改变生产对象的形状、尺寸、相对位置和性能等，使其成为半成品或成品的过程。工艺过程是生产过程中的主要组成部分。

机械制造工艺过程的主要内容包括毛坯和零件成形(铸造、锻压、冲压、焊接、压制、烧结、注塑、压塑等)；机械加工(切削、磨削、特种加工等)；材料改性与处理(热处理、电镀、转化膜、涂装、热喷涂等)；机械装配等工艺过程。

采用机械加工的方法，直接改变毛坯的形状、尺寸和表面质量等，使其成为零件的过程称为机械加工工艺过程(以下简称为工艺过程)。机械加工工艺过程直接决定零件和产品的质量，对产品的成本和生产周期都有较大的影响，是机械产品整个工艺过程的主要组成部分。

在中华人民共和国机械电子工业部发布的 JB/T 5992—1992 标准中，将机械制造工艺方法按大、中、小和细 4 个层次进行了分类，见表 1-1(只列大、中类的)。

表 1-1　机械制造工艺方法类别划分及代码(JB/T 5992—1992)

大类		中类代码									
代码	名称	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		中类名称									
0	铸造		砂型铸造	特种铸造							
1	压力加工		锻造	轧制	冲压	挤压	旋压	拉拔			其他
2	焊接		电弧焊	电阻焊	气焊	压焊			特种焊接		钎焊
3	切削加工		刃具加工	磨削		钳加工					
4	特种加工		电物理加工	电化学加工	化学加工			复合加工			其他
5	热处理		整体热处理	表面热处理	化学热处理						
6	覆盖层		电镀	化学镀	真空沉积	热侵镀	转化膜	热喷涂	涂装		其他
7											
8	装配包装		装配	试验与检验			包装				
9	其他		粉末冶金	冷作	非金属成形	表面处理	防锈	缠绕	编织		其他

1.1.2　机械加工工艺过程的组成

机械加工工艺过程往往是比较复杂的。在工艺过程中，根据被加工零件的结构特点、技术要求，在不同的生产条件下，需要采用不同的加工方法及其加工设备，并通过一系列加工步骤，才能使毛坯成为零件。为了便于深入细致地分析工艺过程，必须研究工艺过程的组成。

机械加工工艺过程是由一个或若干个顺次排列的工序组成的。毛坯依次通过这些工序就成为成品。每一个工序又可分为一个或若干个安装、工位、工步和走刀等。

1. 工序

指一个或一组操作者，在一个工作地点或一台机床上，对一个或同时对几个零件进行加工所连续完成的那一部分工艺过程。构成一个工序的要点是操作者不变，加工对象不变，工作地点(设备)不变，而且工序内的加工工作是连续完成的。也就是根据这些特点来区分是一个工序还是几个工序。一个零件的工艺过程往往是由若干道工序组成的。若生产规模不同，工序的划分及每一道工序所包含的加工内容也有所不同。以图 1.1 所示的阶梯轴加工为例。在单件小批生产时，其工艺过程见表 1-2；若为成批生产时，则见表 1-3。

一般在单件、小批生产时，将工艺过程划分到工序，写明工序内容，画出必要的工序图，操作者就能理解。但在大批、大量生产时，为保证加工质量和生产率，就必须对工艺过程进行更细的划分。

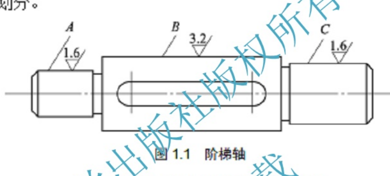


图 1.1　阶梯轴

表 1-2　单件小批生产阶梯轴的工艺过程

工序号	工序内容	设备
1	车一端面，钻中心孔，掉头车另一端面，钻中心孔	车床
2	车外圆 *A*、*B*，切槽，倒角；掉头车外圆 *C*，切槽，倒角	车床
3	铣键槽，去毛刺	铣床
4	磨外圆 *A*、*C*	磨床

表 1-3　成批生产阶梯轴的工艺过程

工序号	工序内容	设备
1	铣端面，打中心孔	铣端面打中心孔机床
2	车外圆 *A*、*B*，切槽，倒角	车床
3	车外圆 *C*，切槽，倒角	车床
4	铣键槽	铣床
5	去毛刺	钳工台
6	磨外圆 *A*、*C*	磨床

2. 安装

工件在机床上每装夹一次所完成的那一部分工序内容。零件从定位到夹紧的整个过程称为零件的安装或装夹。

1) 定位

为了保证一个零件加工表面的精度，以及使一批零件的加工表面的精度一致，那么一个零件放到机床的装夹面上或夹具中时，首先必须占有某一相对刀具及切削成形运动(通常

由机床提供)的正确位置，且逐次加工的一批零件都应占有相同的正确位置，这便叫做定位。

2) 夹紧

为了在加工中使零件在切削力、重力、离心力和惯性力等力的作用下，能保持定位时已获得的正确位置不变，必须把零件压紧、夹牢，这便是夹紧。

工件的装夹，可根据零件加工的不同技术要求，采取先定位后夹紧或在夹紧过程中同时实现定位这两种方式。其目的都是为了保证工件在加工时相对刀具及成形运动具有正确的位置。定位保证零件的位置正确，夹紧保证零件的正确位置不变。正确的安装是保证零件加工精度的重要条件。

一个工序可以包括一次或几次安装。如在表 1-2 工序 1 中，车完一头端面、钻中心孔，是一次安装。调头后，重新定位、夹紧、再车另一头端面、钻中心孔，又是一次安装。故在这个工序中包括两次安装。

特别提示

零件加工过程中，应尽量减少安装次数。因为安装次数太多，往往会降低加工精度和增加工件的装卸时间。

知识链接

工件在机床上的安装方法

工件在机床上的安装，一般可采用如下几种方法：直接找正安装、划线找正安装和用夹具安装。

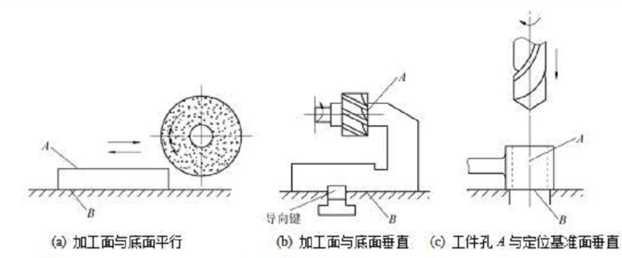
1) 直接找正安装

这种装夹办法是利用机床上的装夹面来对工件直接定位的，工件的定位基准面只要靠紧在机床的装夹面上并密切贴合，不需找正即可完成定位，此后，夹紧工件，使其在整个加工过程中不脱离这一位置，就能得到工件相对刀具及成形运动的正确位置。

图 1.2(a)中工件的加工面 A 要求与工件的底面 B 平行，装夹时将工件的定位基准面 B 靠紧并吸牢在磁力工作台上即可；图 1.2(b)中工件为一夹具底座，加工面 A 要求与底面 B 垂直并与底部已装好导向键的侧面平行，装夹时除将底面靠紧在工作台面上之外，还需使导向键侧面与工作台上的 T 形槽侧面靠紧；图 1.2(c)中工件上的孔 A 只要求与工件定位基准面 B 垂直，装夹时将工件的定位基准面紧靠在钻床工作台面上即可。直接找正安装因其生产率低，故一般多用于单件、小批量生产。定位精度要求特别高时往往用精密量具来直接找正安装。

2) 划线找正安装

先在零件上划出将加工表面的位置，安装零件时按划线用划针找正并夹紧，如图 1.3 所示。这种找正装夹方法的缺点是费时间，生产效率低，所能达到的装夹精度与操作工人的技术水平和所使用的找正工具的精度有关，故主要适用于单件、小批生产。其优点是通过划线可以检查工件各加工表面是否有足够的加工余量，使加工表面与非加工表面保持正确位置，并且安装迅速。对尺寸和质量较大的铸件和锻件，使用夹具成本很高，可按划线找正安装；对于精度较低的铸件或锻件毛坯，无法使用夹具，也可用划线方法，不致使毛坯报废。



(a) 加工面与底面平行　(b) 加工面与底面垂直　(c) 工件孔 A 与定位基准面垂直

图 1.2　直接找正安装

3) 用夹具安装

夹具是根据加工某一零件某一工序的具体加工要求设计的，其上备有专用的定位和夹紧装置，将零件直接装在夹具的定位元件上并夹紧，零件可以迅速而准确地装夹在夹具中。采用夹具装夹，是在机床上先安装好夹具，使夹具上的安装面与机床上的装夹面靠紧并固定，然后在夹具中装夹工件，使工件的定位基准面与夹具上定位元件的定位面靠紧并固定。由于夹具上定位元件的定位面相对夹具的安装面有一定的位置精度要求，故利用夹具装夹就能保证工件相对刀具及成形运动的正确位置关系。这种方法安装迅速方便，定位可靠。例如，加工齿轮件时(图 1.4)，就可以用零件的内孔定位，由夹具保证零件外圆和内孔的同轴度。采用夹具装夹工件，易于保证加工精度、缩短辅助时间、提高生产效率、减轻工人劳动强度和降低对工人的技术水平要求，故广泛应用于成批和大量生产。

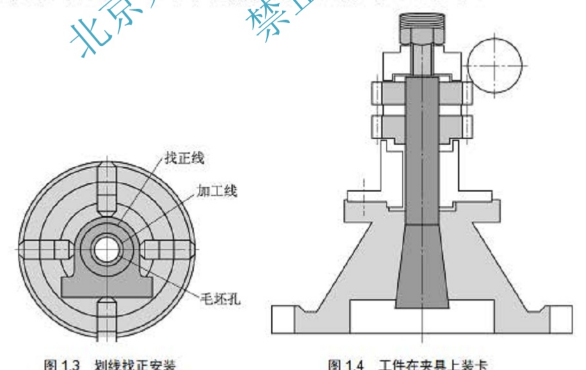


图 1.3　划线找正安装　　图 1.4　工件在夹具上装卡

3．工位

在某一工序中，有时为了减少由于多次装夹而带来的误差及时间损失往往采用转位(或移位)工作台或转位夹具。零件在一次安装中先后处于几个不同的位置进行加工。工件在机床所占的每一个位置上所完成的那一部分工艺过程称为工位。

图 1.5 所示为在多工位机床上加工孔的例子。在该工序中工件仅安装一次，但利用回转工作台使每个工件能在 6 个工位上依次地进行钻、扩、铰加工。

采用这种多工位加工方法，可以减少安装次数，提高加工精度和生产率。

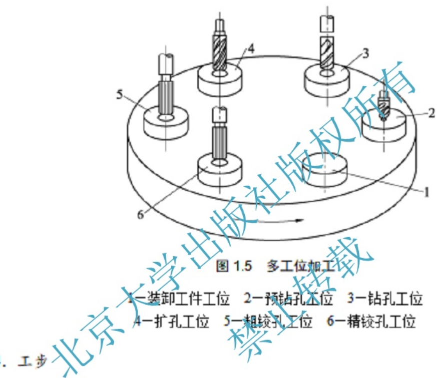


图 1.5　多工位加工

1—装卸工件工位　2—预钻孔工位　3—钻孔工位
4—扩孔工位　5—粗铰孔工位　6—精铰孔工位

4．工步

一道工序(一次安装或一个工位)中，可能需要加工若干个表面也可能虽只加工一个表面但却要用若干把不同刀具或虽只用一把刀具但却要用若干种不同切削用量分作若干次加工。在同一个工序中，当加工表面不变、切削工具不变、切削用量中的进给量和切削速度不变的情况下所完成的那部分工艺过程称为工步。当构成工步的任一因素改变后，即成为新的工步。一个工序可以只包括一个工步，也可以包括几个工步。如表 1-2 中，第一道工序中就包含了 4 个工步。为简化工艺文件，对于那些连续进行的若干个相同的工步，通常都看作一个工步。例如，加工图 1.6 所示零件，在同一工序中，连续钻 4 个 ϕ15mm 的孔，就可看作一个工步。

在机械加工中，有时会出现用几把不同的刀具同时加工一个零件的几个表面的工步，称为复合工步。用两把车刀一个钻头同时加工工件表面，形成复合工步，如图 1.7 所示。用两把铣刀同时加工工件表面，构成复合工步如图 1.8 所示。

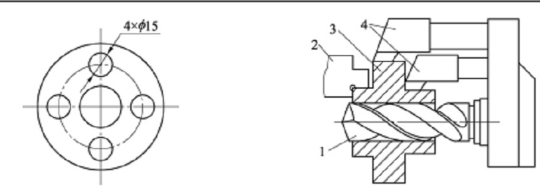


图 1.6 简化相同工步的实例

图 1.7 复合工步实例


1—钻头 2—夹具 3—零件 4—工具

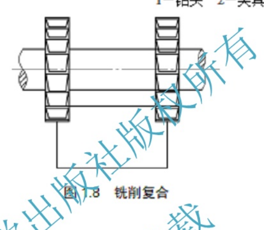


图 1.8 铣削复合

5．走刀

加工表面由于被切去的金属层较厚，需要分几次切削。走刀是指在加工表面上切削一次所完成的那一部分工步，每切去一层材料称为一次走刀，如图 1.9 所示。一个工步可包括一次或几次走刀。

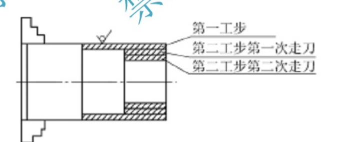


图 1.9 棒料车削加工成阶梯轴的多次走刀

特别提示

工序是组成工艺过程的基本单元，也是生产计划的基本单元。每个工序中可以一次安装或多次安装，每一个工序可以包含一个或几个工步，每个工序可以有一个工位或多工位加工，每个工步通常包含一次走刀，也可以包含几次走刀。

1.1.3 生产类型及其对工艺过程的影响

机械加工工艺受到生产类型的影响。各种机械产品的结构、技术要求等差异很大，但它们的制造工艺则存在着很多共同的特征。这些共同的特征取决于企业的生产类型，而企业的生产类型又由企业的生产纲领决定。

1．生产纲领

生产类型是指产品生产的专业化程度，生产纲领是指企业在计划期内应当生产的产品产量和进度计划。计划期常定为一年，所以年生产纲领也称年产量。

零件的生产纲领要计入备品和废品的数量，可按式(1-1)计算：

$$N=Qn(1+\alpha)(1+\beta) \tag{1-1}$$

式中　N——生产纲领，件/年；

Q——产品的年产量，台/年；

n——每台产品中该零件的数量，件/台；

α——备品的百分率；

β——废品的百分率。

2．生产类型

生产类型是指企业(或车间、工段、班组、工作地)生产专业化程度的分类。根据零件的生产纲领或生产批量可以划分出不同的生产类型：单件生产、成批生产、大量生产。

(1) 单件生产。其基本特点是生产的产品品种繁多，每种产品仅制造一个或少数几个，很少重复生产。重型机械制造、专用设备制造、新产品试制等都属于单件生产。

(2) 成批生产。基本特点是一年中分批次生产相同的零件，生产呈周期性重复。机床、工程机械、液压传动装置等许多标准通用产品的生产都属于成批生产。

(3) 大量生产。基本特征是同一产品的生产数量很大，通常是同一工作地长期进行同一种零件的某一道工序的加工。汽车、拖拉机、轴承等的生产都属于大量生产。

对于成批生产而言，每一次投入或产出的同一产品(或零件)的数量简称批量。批量可根据年产量及一年中的生产批数计算确定。一年的生产批数根据用户的需要、零件的特征、流动资金的周转、仓库容量等具体情况确定。在一定的范围内，各种生产类型之间并没有十分严格的界限。按批量的多少，成批生产又可分为小批、中批和大批生产 3 种。在工艺上，小批生产和单件生产相似，常合称为单件小批生产；大批生产和大量生产相似，常合称为大批大量生产。生产类型的具体划分，可根据生产纲领和产品及零件的特征或工作地每月担负的工序数确定见表 1–4。

特别提示

在生产过程中，习惯性地将生产类型称为单件小批生产、成批生产、大批大量生产 3 种。

表 1–4　生产类型和生产纲领的关系

生产类型	生产纲领/(件/年或台/年)			工作地每月担负的工作地数/(工序数/月)
	小型机械或轻型零件	中型机械或中型零件	重型机械或重型零件	
单件生产	≤100	≤10	≤5	不作规定
小批生产	＞100～500	＞10～150	＞5～100	＞20～40
中批生产	＞500～5000	＞150～500	＞100～300	＞10～20
大批生产	＞5000～50000	＞500～5000	＞300～1000	＞1～10
大量生产	＞50000	＞5000	＞1000	1

表 1–4 中的轻型、中型和重型零件可参考表 1–5 所列数据确定。

表 1-5　不同机械产品的零件质量型别

机械产品类别	零件的质量/kg		
	轻型零件	中型零件	重型零件
电子机械	≤4	＞4～30	＞30
机床	≤15	＞15～50	＞50
重型机械	≤100	＞100～2000	＞2000

根据上述划分生产类型的方法可以发现，同一企业或车间可能同时存在几种生产类型的生产。判断企业或车间的生产类型，应根据企业或车间中占主导地位的工艺过程的性质来确定。随着科学技术的发展和市场需求的变化及竞争的加剧，产品更新换代的周期越来越短、产品向多样化、个性化发展，制造业中单件或多品种、小批量生产占多数并且有逐渐增加的趋势。

3. 各种生产类型的工艺特征

生产批量不同时，采用的工艺过程也有所不同。一般对单件小批量生产，只要制定一个简单的工艺路线；对大批量生产，则应制定一个详细的工艺规程，对每个工序、工步和工作过程都要进行设计和优化，并在生产中严格遵照执行。详细的工艺规程，是工艺装备设计制造的依据。

为了获得最佳的经济效益，对于不同的生产类型，其生产组织、生产管理、车间管理、毛坯选择、设备工装、加工方法和操作者的技术等级要求均有所不同，具有不同的工艺特点，各种生产类型的工艺特征见表 1-6。

表 1-6 中一些项目的结论都是在传统的生产条件下归纳的。由于大批大量生产采用专用高效设备及工艺装备，因而产品成本低，但往往不能适应多品种生产的要求；而单件小批生产由于采用通用设备及工艺装备，因而容易适应品种的变化，但产品成本高，有时还跟不上市场的需求。因此，目前各种生产类型的企业既要适应多品种生产的要求，又要提高经济效益，它们的发展趋势是既要朝着生产过程柔性化的方向发展，又要上规模、扩大批量，以提高经济效益。成组技术为这种发展趋势提供了重要的基础，随着成组技术的应用和数控机床的普及，各种生产类型下的工艺特征也在起着相应的变化，各种现代先进制造技术也都是在这种要求下应运而生的。

表 1-6　各种生产类型的工艺特征

工艺特征	生产类型		
	单件小批	中批	大批大量
零件的互换性	配对制造，互换性低，多采用钳工修配	多数互换，部分试配或修配	全部互换，高精度偶件采用分组装配、配磨
毛坯的制造方法及加工余量	自由锻造，木模手工造型；毛坯精度低，余量大	部分采用模锻，金属模造型；毛坯精度及余量中等	广泛采用模锻，机器造型等高效方法；毛坯精度高、加工余量小
机床设备及其布置形式	通用机床按机群式排列；部分采用数控机床及柔性制造单元	通用机床和部分专用机床及高效自动机床，机床按零件类别分工段排列	广泛采用自动机床、专用机床，采用自动线或专用机床流水线排列

续表

工艺特征	生产类型		
	单件小批	中批	大批大量
夹具及尺寸保证	通用夹具、标准附件或组合夹具；划线试切保证尺寸	通用夹具，专用或成组夹具；定程法保证尺寸	高效专用夹具，定程及自动测量控制尺寸
刀具与量具	通用刀具，标准量具	专用或标准刀具、量具	专用刀具、量具，自动测量
对工人的要求	需要技术熟练的工人	需要一定熟练程度的技术工人	对操作工人的技术要求较低，对调整工人的技术要求较高
工艺规程	编制简单的工艺过程卡片	编制详细的工艺规程及关键工序的工序卡片	编制详细的工艺规程、工序卡片、调整卡片
生产率	用传统加工方法，生产率低，用数控机床可提高生产率	中等	高
成本	较高	中等	低
发展趋势	采用成组工艺、数控机床、加工中心及柔性制造单元	采用成组工艺、柔性制造系统或柔性自动线	用计算机控制的自动化制造系统、车间或无人工厂，实现自适应控制

1.2　工艺规程的概念、作用、类型及格式

1.2.1　工艺规程的含义

1. 工艺规程的概念

规定产品或零部件制造工艺过程和操作方法等的工艺文件称为工艺规程。其中，规定零件机械加工工艺过程和操作方法等的工艺文件称为机械加工工艺规程。它是在具体的生产条件下，最合理或较合理的工艺过程和操作方法，并按规定的形式书写成工艺文件，经审批后用来指导生产的。

2. 工艺规程的作用

工艺规程是在总结实践经验的基础上，依据科学的理论和必要的工艺试验后制订的，反映了加工中的客观规律。因此，工艺规程是指导工人操作和用于生产、工艺管理工作的主要技术文件，又是新产品投产前进行生产准备和技术准备的依据和新建、扩建车间或工厂的原始资料。此外，先进的工艺规程还起着交流和推广先进经验的作用。典型和标准的工艺规程能缩短工厂的生产准备时间。

工艺规程是经过逐级审批的，因而也是工厂生产中的工艺纪律，有关人员必须严格执行。但工艺规程也不是一成不变的，随着科学技术的进步和生产的发展，工艺规程会出现某些不相适应的问题，因而工艺规程应定期调整，及时吸取合理化建议、技术革新成果、新技术和新工艺，使工艺规程更加完善和合理。

3．工艺规程的类型和格式

机械电子工业部指导性技术文件 JB/Z 338.5－1983《工艺管理导则工艺规程设计》中规定工艺规程的类型有以下几种。

(1) 专用工艺规程：针对每一个产品和零件所设计的工艺规程。

(2) 通用工艺规程。

① 典型工艺规程：一组结构相似的零部件所设计的通用工艺规程。

② 成组工艺规程：按成组技术原理将零件分类成组，针对每一组零件所设计的通用工艺规程。

(3) 标准工艺规程：已纳入标准的工艺规程。

本章主要阐述零件的机械加工专用工艺规程的制订，它是其他几种工艺规程制订的基础。

为了适应工业发展的需要，加强科学管理和便于交流，机械电子工业部还制订了指导性技术文件 JB/Z 187.3－1988《工艺规程格式》，要求各机械制造厂按统一规定的格式填写。

按照规定，属于机械加工工艺规程的有以下几种。

(1) 机械加工工艺过程卡片。

(2) 机械加工工序卡片。

(3) 标准零件或典型零件工艺过程卡片。

(4) 单轴自动车床调整卡片。

(5) 多轴自动车床调整卡片。

(6) 机械加工工序操作指导卡片。

(7) 检验卡片等。

属于装配工艺规程的有以下几种。

(1) 工艺过程卡片。

(2) 工序卡片。

最常用的是机械加工工艺过程卡片和机械加工工序卡片。

机械加工工艺过程卡片的作用是概略说明加工的工艺路线，也是工艺规程的总纲。其内容包括按工艺路线排列的顺序、加工车间、应用的机床和工艺装备、工人技术等级和时间定额。它是制订其他工艺文件的基础，主要用于单件小批生产和中批生产的零件。本卡片是生产管理方面的文件，其格式见表 1-7。

机械加工工序卡片是以工序为单位详细说明整个工艺过程的工艺文件，它是根据工艺卡片制订的。其内容除工艺卡片中每个工序要求的内容以外，还应画出工序简图，在工序简图上标出定位基准、加工表面及其粗糙度、工序尺寸及其公差以及夹紧力的方向和着力点，在卡片中还应说明走刀长度、单边余量、走刀次数和辅助工具等。工序卡片是用于指导工人进行生产的一种工艺文件，主要适用于大批大量生产中所有的零件，中批生产中的复杂产品的关键零件以及单件小批生产中的关键工序，其格式见表 1-8。

对于油漆、包装、涂防锈油、探伤、去磁、动平衡等工艺，常常不必单独制订工艺规程，可以制订工艺守则，说明其工艺要求和工艺过程，作为通用性的工艺文件。

实际生产中并不需要各种文件俱全，标准中允许结合具体情况作适当增减。未规定的其他工艺文件格式，可根据需要自定。

表 1-7　机械加工工艺过程卡

<table>
<tr><td rowspan="4">(工厂名)</td><td rowspan="4">机械加工工艺过程卡片</td><td colspan="2">产品名称及型号</td><td></td><td colspan="2">零件名称</td><td></td><td colspan="2">零件图号</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">材料</td><td>名称</td><td></td><td rowspan="2">毛坯</td><td>种类</td><td></td><td rowspan="2">零件重量(kg)</td><td>毛重</td><td></td><td>第　页</td></tr>
<tr><td>牌号</td><td></td><td>尺寸</td><td></td><td>净重</td><td></td><td>共　页</td></tr>
<tr><td>性能</td><td></td><td colspan="2">每料件数</td><td></td><td>每台件数</td><td></td><td>每批件数</td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="2">工序号</td><td rowspan="2">工序内容</td><td rowspan="2">加工车间</td><td rowspan="2">设备名称及编号</td><td colspan="3">工艺设备名称及编号</td><td rowspan="2">技术等级</td><td colspan="2">时间定额/min</td></tr>
<tr><td>夹具</td><td>刀具</td><td>量具</td><td>单件</td><td>准备—终结</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">更改内容</td><td colspan="9"></td></tr>
<tr><td colspan="9"></td></tr>
<tr><td colspan="9"></td></tr>
</table>

编制		抄写		校对		审核		批准	

特别提示

工艺文件的种类和形式多种多样，它的详简程度也有很大差别，要视生产类型而定。在单件小批生产中，一般只编写简单的工艺过程卡片，只有关键零件或复杂零件才制订较详细的工艺规程。在成批生产中多采用机械加工工艺卡片。在大批大量生产中，则要求完整和详细的工艺文件，各工作地点都订有机械加工工序卡片。

1.2.2　制订工艺规程的基本要求、主要依据和制订步骤

1. 制订工艺规程的基本要求

制订工艺规程的基本要求可以归结为质量、生产率和经济性三个方面，这三者虽然有时互相矛盾，但只要把它们处理好，就会成为一个统一体。

在这三个要求中，质量是首要的，它是第一性的。质量表现在机械产品的各项技术性能指标上，例如对于机床来说，它的工作行程、几何精度、切削功率、使用寿命及动态刚度等都有要求。对于内燃机来说，它的输出功率、耗油量、体积和重量系数等都是反映质量的指标。质量不能保证，根本就谈不上数量。质量又是一种信誉，是使用者的评价。因此，质量是一定要保证的。质量和生产率之间是有密切联系的，质量好、使用寿命长，就相当于提高了产量。不能只是片面地看到为了保证质量，要多花费一些工时，从而影响了生产率；要看到没有质量，生产率再高，只会带来更大的浪费，实际上生产率更低。

在保证质量的前提下，应该不断地最大限度地提高生产率，满足生产量要求。对一个企业来说，生产率也是硬指标。在制定工艺规程时，要保证完成一定的生产率，应该把它和质量统一起来，如果两者有矛盾，则生产率要服从于质量，应在保证质量的前提下解决生产率的问题。

在保证质量的前提下，应尽可能地节约耗费，减少投资，降低制造成本，这就是经济性。不能用降低质量要求的办法来降低成本。生产率和经济性之间有时会产生矛盾，在战争时期，为了赢得战争的胜利，生产率是重要的，成本将为其次。有时可以不惜成本，但在和平建设时期，应同时考虑生产率和经济性问题，为建设事业积累更多的资金。

因此，好的工艺规程应该体现质量、生产率和经济性的统一。同时，还应在充分利用本企业现有生产条件的基础上，尽可能采用国内、外先进工艺技术和经验，并保证良好的劳动条件。

由于工艺规程是直接指导生产和操作的重要技术文件，所以工艺规程还应做到正确、完整、统一和清晰，所用术语、符号、计量单位、编号等都要符合相应标准。

2. 制订工艺规程的主要依据(即原始资料)

(1) 产品的装配图样和零件图样。

(2) 产品的生产纲领。

(3) 现有生产条件和资料，它包括毛坯的生产条件或协作关系、工艺装备及专用设备的制造能力、有关机械加工车间的设备和工艺装备的条件、技术工人的水平以及各种工艺资料和标准等。

(4) 国内、外同类产品的有关工艺资料等。

3. 制订工艺规程的步骤

(1) 熟悉和分析制订工艺规程的主要依据，确定零件的生产纲领和生产类型，进行零件的结构工艺性分析。

(2) 确定毛坯，包括选择毛坯类型及其制造方法。

(3) 拟定工艺路线。这是制订工艺规程的关键一步。

(4) 确定各工序的加工余量，计算工序尺寸及其公差。

(5) 确定各主要工序的技术要求及检验方法。

(6) 确定各工序的切削用量和时间定额。

(7) 进行技术经济分析，选择最佳方案。

(8) 填写工艺文件。

1.3　工艺分析及毛坯选择

1.3.1　工艺分析

工艺分析是制定工艺规程的基础，必须根据不同产品，不同的生产规模和工厂的具体情况，进行细致的工艺分析，才能制定出合理的工艺规程。工艺分析时一般应考虑的问题包括以下几点：

1. 分析产品图样

首先应分析该零件的零件图，以及该零件所在的部件或总成的装配图。图样上应有足够的投影和剖面，注明各部分的尺寸、加工符号、公差和配合、零件材料规格和数量等。所有不能用图形或符号表示的要求，一般都以技术条件来表明。如热处理的种类及要求、某些零件的特殊要求，如动平衡、较正重量、抗蚀处理等。在分析图样的同时可以考虑这些要求是否合理，在现有生产条件下能否达到，以便采取适当措施。

2. 审查零件的材料及热处理是否恰当

工艺分析中审核选材时主要考虑：如果没有零件图中所要求的材料，则需考虑材料代用问题；对该种材料所规定的热处理要求能否实现，如不能实现，则考虑代用热处理工艺问题。

3. 结构工艺性分析

一个好的机器产品和零件结构，不仅要满足使用性能的要求，而且要便于制造和维修，即满足结构工艺性的要求。在产品技术设计阶段，工艺人员要对产品结构工艺性进行分析和评价；在产品工作图设计阶段，工艺人员应对产品和零件结构工艺性进行全面审查并提出意见和建议。制订机械加工工艺规程前，要进行结构工艺性分析。结构工艺性包含零件的结构工艺性和产品的结构工艺性两个方面。

1) 零件的结构工艺性

零件结构工艺性是指所设计的零件在能满足使用要求的前提下制造的可行性和经济性。它由零件结构要素的工艺性和零件整体结构的工艺性两部分组成。包括零件的各个制

造过程中的工艺性，有零件结构的铸造、锻造、冲压、焊接、热处理、切削加工等工艺性。由此可见，零件结构工艺性涉及面很广，具有综合性，必须全面综合地分析。

(1) 零件结构要素的工艺性。

组成零件的各加工表面称为结构要素，零件的结构对其机械加工工艺过程的影响很大。使用性能完全相同而结构不同的两个零件，它们的加工难易和制造成本可能有很大差别。所谓良好的工艺性，首先是这种结构便于机械加工，即在同样的生产条件下能够采用简便和经济的方法加工出来。此外，零件结构还应适应生产类型和具体生产条件的要求。

零件结构要素的工艺性主要表现在以下几个方面。

① 各要素形状尽量简单，面积尽量小，规格尽量统一和标准，以减少加工时调整刀具的次数。

② 能采用普通设备和标准刀具进行加工，刀具易进入、退出和顺利通过，避免内端面加工，防止碰撞已加工面。

③ 加工面与非加工面应明显分开，加工时应使刀具有较好的切削条件，以提高刀具的寿命和保证加工质量。

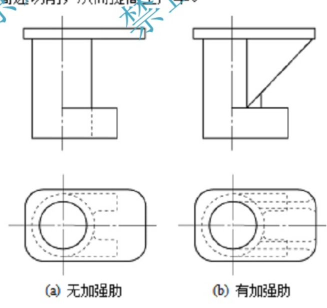
(2) 零件整体结构的工艺性。

零件整体结构的工艺性，主要表现在以下几个方面。

① 尽量采用标准件、通用件和相似件。

② 有位置精度要求的表面应尽量能在一次安装下加工出来。如箱体零件上的同轴线孔，其孔径应当同向或双向递减，以便在单向或双面镗床上一次装夹把它们加工出来。

③ 零件应有足够的刚性，防止在加工过程中变形，以便于采用高速和多刀切削，保证加工精度。例如，图 1.10(b)的零件有加强肋，图 1.10(a)的零件无加强肋，显然是有加强肋的零件刚性好，便于高速切削，从而提高生产率。



(a) 无加强肋　　(b) 有加强肋

图 1.10　增设加强肋以提高零件的刚性

④ 有便于装夹的基准和定位面。图 1.11 所示为机床立柱，应在其上增设工艺凸台，以便加工时作为辅助定位基准。

⑤ 节省材料，减轻质量。

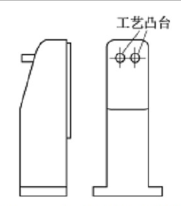


图 1.11 机床立柱的工艺凸台

2) 产品结构的工艺性

产品结构的工艺性是指所设计的产品在满足使用要求的前提下，制造、维修的可行性和经济性。显然，制造的可行性和经济性应当包含制造过程的各个阶段，包括毛坯制造、机械加工和装配等。此处重点分析产品结构的装配工艺性。

产品结构的装配工艺性可以从以下几个方面来分析。

(1) 独立的装配单元。所谓独立的装配单元，就是指机器结构能够划分成独立的部件、组件，这些独立的部件和组件可以各自独立地进行装配，最后再将它们总装成一台机器。这样就可以组织平行流水装配，使装配工作专业化，有利于装配质量的提高，最大限度地缩短装配周期，提高装配劳动生产率。

(2) 便于装配和拆卸。

(3) 尽量减少在装配时的机械加工和修配工作。

表 1-9 列举了生产中常见的结构工艺性定性分析的实例，供参考和借鉴。

表 1-9 结构工艺性实例分析

序号	结构工艺性内容	不好	好
1	尽量减少大平面加工，减少材料及切削工具的消耗量		
2	尽量减少深孔加工		
3	键槽加工在同一方向可以减少加工次数		

续表

序号	结构工艺性内容	不好	好
4	槽宽尺寸相同，采用相同刀具一次加工		
5	(1) 加工面与非加工面明显分开 (2) 凸台高度相同，一次加工		
6	磨削表面应有退刀槽		
7	(1) 内螺纹孔口应倒角 (2) 根部有退刀槽		
8	孔离箱壁不应太近，否则钻头无法加工		
9	槽底与孔母线相平，易划伤加工面		
10	磨削锥面时划伤已加工面		
11	(1) 钻孔的出入端均应避免斜面，否则钻头易引偏或折断 (2) 出口处避免有阶梯，否则钻头易折断		
12	避免斜孔加工；可以简化夹具结构；几个平行的孔便于同时加工；减少孔的加工量		
13	加工中尽量采用标准刀具		

续表

序号	结构工艺性内容	不好	好
14	封闭平面有与刀具形状和尺寸相对应的过渡表面，可以减少加工量，并采用高生产率的加工方法及标准刀具		D_X D_X
15	孔内加工，测量环形槽不方便		
16	轴上零件可单独组装成组件后一次装入箱体内		
17	箱体内搭子上加工油孔不方便		

1.3.2 毛坯选择

在制订零件机械加工工艺规程前，还要确定毛坯，包括选择毛坯类型及制造方法，确定毛坯精度。零件机械加工的工序数量、材料消耗和劳动量，在很大程度上与毛坯有关。例如：毛坯的形状和尺寸越接近成品零件，即毛坯精度越高，则零件的机械加工劳动量越少，材料消耗也少，机械加工的生产率可提高，成本可降低。但是，毛坯的制造费用提高了。因此，确定毛坯要从机械加工和毛坯制造两方面综合考虑，以求得最佳效果。

1. 毛坯种类

常用的毛坯种类有以下几种。

(1) 铸件：适用于做形状复杂的零件毛坯。

(2) 锻件：适用于要求强度较高、形状比较简单的零件。

(3) 型材：热轧型材的尺寸较大，精度低，多用作一般零件的毛坯。冷拉型材尺寸较小，精度较高，多用于制造毛坯精度要求较高的中小型零件，适宜于自动机床加工。

(4) 焊接件：对于大件来说，焊接件简单方便，特别是单件小批生产可以大大缩短生产周期，但焊接的零件变形较大，需要经过时效处理后才能进行机械加工。

(5) 冷冲压件：适用于形状复杂的板料零件，多用于中小尺寸零件的大批、大量生产。

一般说来，当设计人员设计零件并选好材料后，也就大致确定了毛坯的种类。如铸铁材料毛坯均为铸件，钢材料毛坯一般为锻件或型材等。各种毛坯的制造方法很多，概括起来说，毛坯的制造方法越先进，毛坯精度越高，其形状和尺寸越接近于成品零件，这就使机械加工的劳动量大大减少，材料的消耗也低，使机械加工成本降低，但毛坯的制造费用却因采用了先进的设备而提高。因此，在选择毛坯时应当综合考虑各方面的因素，以求得最佳的效果。

2. 选择毛坯时应考虑的因素

(1) 零件的材料及其力学性能：如前所述，零件的材料大致确定了毛坯的种类，而其力学性能的高低，也在一定程度上影响毛坯的种类，如力学性能要求较高的钢件，其毛坯最好用锻件而不用型材。

(2) 生产类型：不同的生产类型决定了不同的毛坯制造方法。在大批量生产中，应采用精度和生产率都较高的先进的毛坯制造方法，如铸件应采用金属模机器造型，锻件应采用模锻；单件小批生产则一般采用木模手工造型或自由锻等比较简单方便的毛坯制造方法。

(3) 零件的结构形状和外形尺寸：在充分考虑了上述两项因素后，有时零件的结构形状和外形尺寸也会影响毛坯的种类和制造方法。如常见的一般用途的钢质阶梯轴，当各台阶直径相差不大时可用型材，若各台阶直径相差很大时，宜用锻件；成批生产中，中小型零件可选用模锻，而大尺寸的钢轴受到设备和模具的限制一般选用自由锻等。零件尺寸越大，采用模锻、精密铸造的费用就越高，可能性也就越小。

(4) 充分考虑采用新工艺、新技术和新材料的可能性。为节约材料和能源，随着毛坯制造向专业化生产发展，目前毛坯制造方面的新工艺、新技术和新材料的发展很快。例如：精铸、精锻、冷轧、冷挤压、粉末冶金和工程塑料等，在机械中的应用日益广泛。应用这些方法后，可大大减少机械加工量，有时甚至可不再进行机械加工，其经济效果非常显著。

当然，在考虑上述诸因素的同时，不应当脱离具体的生产条件，如现场毛坯制造的实际水平和能力，毛坯车间近期的发展情况以及由专业化工厂提供毛坯的可能性等。

在确定了毛坯制造方式以后，应当了解和熟悉毛坯的特点，如铸件的分型面、浇注系统的位置、余量和拔模斜度等。通常以零件——毛坯合图的方式将它们表示出来，作为正式制订机械加工工艺规程时的原始依据。



机械制造工艺的新发展

制造工艺方法对产品质量、成本、生产周期等具有重要的影响，因而是企业竞争力的重要因素。当前，制造工艺的发展主要表现在3个方面：精密与超精密加工技术迅速发展；传统制造方法的不断改进；非传统制造方法的产生与发展。

1. 精密与超精密加工方法的分类

精密、超精密及纳米加工技术是现代制造业的主要发展方向之一，也是先进制造技术的主要内容。这些技术在提高机电产品的性能、质量和发展高新技术方面都起着极为重要的作用。可以说，精密加工技术是产品在国际市场竞争中取得胜利的最关键技术之一。表1-10列出了精密加工、超精密加工和纳米加工的加工精度。

表1-10　加工精度

精度等级	尺寸精度/μm	表面粗糙度/μm	加工技术
微米级	1～0.1	Ra=0.3～0.03	精密加工
亚微米级	0.1～0.01	Ra=0.03～0.005	超精密加工
纳米级	<0.001	Ra<0.005	纳米加工

根据加工过程材料重量的增减，精密与超精密加工方法可分为3种类型。

1) 减量制造

这类制造工艺以金属切削工艺和特种加工工艺为代表，包括零件的传统制造方法，即车、铣、刨、磨、镗、钻等工艺和特种加工：激光加工、线切割、电火花等，都是采用在原始材料上通过不同的方法去除一部分多余的材料，从而达到设计所要求的形状、尺寸和公差。这种加工可看成零件做减法(Subtraction)，即在毛坯上减去多余材料而获得零件。该种工艺的大部分能量消耗在去除材料上，因此无功资源消耗多、成形周期长、材料浪费严重。但仍是目前应用最广的一种工艺方法。

2) 增量制造(结合加工)

该制造工艺在成形思想上有了较大的突破，与去除加工相对应，其采用的是加法，因此也称为添加成形或增量制造(Adding Forming)。它充分利用计算机数据模型和自动成形系统相结合，采用材料添加的方法分层制造零件，可制造各种形状复杂的零件，制造周期大大缩短，材料利用率高，在制造过程中不产生力，能量消耗较低。该工艺方法经不断发展和完善，形成了目前各种各样的快速制造方法。

3) 等量制造(变形加工或近净尺寸成形)

该制造工艺利用材料的塑性，将半固化的流体材料通过模具或压力的作用，定形成各种形状与尺寸的零件。该工艺以热加工形式为主，其在成形过程中体积不发生明显的变化或发生少量的变化，因此又称为变形加工或近净尺寸成形(Net Forming)。它将新材料、新能源、精密模具技术、计算机技术、自动化技术等多种高新技术融入传统的毛坯成形技术，使之由粗糙成形变为优质、高效、高精度、轻量化、低成本的成形技术。采用近净成形技

术所获得的机械零件具有精确的外形、高的尺寸精度、形状精度和好的表面粗糙度。

近净成形技术涵盖精密铸造成形、精密塑性成形、精密连接、精密热处理改性与表面改性、高精度模具等专业领域，是一项集新工艺、新材料、新装备以及相关高新技术成果于一体的综合技术。

精密与超精密加工方法分类见表 1-11。

表 1-11　精密与超精密加工方法分类

分类	加工机理		加工方法示例
减量制造	电物理加工		电火花加工(电火花成形、电火花切割)
	电化学加工		电解加工、蚀刻、化学机械抛光
	力学加工		切削、磨削、研磨、抛光、超声加工、喷射加工
	热蒸发(扩散、溶解)		电子束加工、激光加工
增量制造	附着加工	化学	化学镀、化学气相沉积
		电化学	电镀、电铸
		热熔化	真空蒸镀、熔化镀
	注入加工	化学	氧化、氮化、活性化学反应
		电化学	阳极氧化
		热熔化	掺杂、渗碳、烧结、晶体生长
		物理	离子注入、离子束外延
	结合加工	热物理	激光焊接、快速成形
		化学	化学粘接
等量制造	热流动		精密锻造、电子束流动加工、激光流动加工
	黏滞流动		精密铸造、压铸、注塑
	分子定向		液晶定向

由表 1-11 可见，精密与超精密加工方法中有些是传统加工方法的精化，有些是特种加工方法的精化，有些则是传统加工方法及特种加工方法的复合。

2. 几种典型的先进制造工艺方法简介

1) 几种典型的减量制造工艺

(1) 超高速切削技术。

以高切削速度、高进给速度和高加工精度为主要特征的超高速切削技术，是最近十几年来迅速崛起的一项高新技术。目前世界上对超高速切削速度范围迄今未作出统一的规定，但通常把切削速度比常规切削速度高 5～10 倍以上的叫做超高速切削。它具有以下优点：有效缩短加工时间、大幅度提高加工精度、表面质量高和工件热变形小等。

超高速加工技术具有良好的应用前景，特别是加工那些常规加工方法难以胜任的高强度、高硬度、难加工的材料。超高速加工技术已显示出它的优越性。目前超高速加工技术主要用于精加工。

(2) 精密、超精密切削加工。

精密和超精密切削加工是在传统切削加工技术基础上，综合应用近代科技和工艺成果而形成的一门高新技术。常用的精密、超精密加工方法包括精密、超精密车削；精密、超精密铣削；精密、超精密镗削；微孔钻削等。

(3) 超精密磨削和超精密研磨。

精密砂轮磨削主要是靠砂轮的精细修整，使磨粒在具有大量的等高微刃的状态下进行加工，以使被加工表面留下大量残留高度极小、极微细的磨削痕迹，从而得到低的表面粗糙度。然后经过无火花磨削过程，在微切削、滑挤、摩擦等的作用下，可使得被加工表面达到镜面程度，并获得高精度。磨粒上大量的等高微刃是用金刚石修整工具以极低且均匀的进给，精细修整而得到的，超精密砂轮磨削磨粒去除的切屑极薄，磨粒将承受很高的应力，切削刃表面受到高温和高压作用，因此要采用金刚石、立方氮化硼等高硬度磨料砂轮进行磨削。

研磨是使用研具、游离磨料进行微量切削的精密和超精密加工方法。在被加工表面和研具之间加入游离磨料和润滑液，使被加工表面和研具在加压的情况下产生相对运动，磨料产生切削、挤压等作用，从而去除被加工表面的凸出部分，提高被加工表面的精度，降低表面粗糙度值。

新型精密和超精密研磨方法见表1-12。

表1-12　新型精密和超精密研磨方法

研磨方法	研磨工具	加工特征	加工误差/μm	表面粗糙度 Ra/μm	应用举例
超精密研磨	铸铁、金刚石、氧化铝、碳化硅、水	用研磨机研磨	0.1	0.008	磁盘基片、金属模、镜片、棱镜
磁性研磨	磁性磨料	在直流磁场作用下研磨	1	0.01	内外表面、形状复杂零件、型腔
滚动研磨	固结磨料、游离磨料、化学或电解作用液	工件带动研具振动、旋转或摆动，使研具和工件型腔间产生相对运动	1	0.01	复杂型腔
流体研磨剂研磨	超微细砂粒、超纯水、聚氨酯橡胶球滚筒	工件回转，研磨液中的砂粒磨削产生轻微的微小弹性破坏加工，可用计算机辅助研磨	高精度	镜面	X射线反射镜、非球面镜片、金属模
柔性磨体振动研磨	高分子聚合物、磨料、防黏剂、润滑剂	用研磨机，在摆动中柔件磨料与工件相对运动	0.5～1.2	0.012	孔、小沟槽、腔体

2) 几种典型的增量制造工艺

(1) 立体光刻成形(Stereo—Lithography Apparatus，SLA)技术是Charles Hull于1986年研制成功的，1987年该项技术获美国专利，1987年由美国3D Systems公司商品化。SLA的工艺是使用液相光敏树脂为成形材料，采用氦隔(Hecd)激光器、氩离子(Argon)激光器或固态(Solid)激光器，利用光固化原理一层层扫描液相树脂成形，扫描系统由激光部件和反射镜构成，根据计算机指令，通过反射镜，控制激光束在$X-Y$平面遵循切片轮廓，按一定模式扫描切片内部，使光敏树脂暴露在紫外激光下产生光聚合反应后固化，形成一个薄层截面，然后，通过计算机控制升降台移动，使固化层下降，再对其上面的固化层进行扫

描，与前一层固化在一起，这样，通过控制激光 $X-Y$ 方向的水平运动和升降台的垂直运动将一层层的液相薄层扫描，固化后粘结在一起，直到零件制作完毕。

(2) 选择性激光烧结(Slective Laser Sintering，SLS)方法是美国得克萨斯大学奥斯汀分校的 C.R.Deckard 于 1989 年首先研制出来的，同年获美国专利。DTM 公司 1992 年首先推出了 SLS 商品化产品“烧结站 2000 系统”，SLS 的原理与 SLA 十分相像，主要区别在于所使用的材料及其性状。SLA 所用的材料是液态的紫外光敏可凝固树脂，而 SLS 则使用粉末状的材料，这是该项技术的主要优点之一。因为理论上任何可熔的粉末都可以用来制造模型，这样的模型可以做实用的原型元件。

目前，可用于 SLS 技术的材料主要有四类：金属类、陶瓷类、塑料类、复合材料类。

SLS 采用 CO_2 激光束对粉末状的成形材料进行分层扫描，受到激光束照射的粉末被烧结。当一层被扫描烧结完毕后，工作台下降一层的厚度，提供粉末的容器内活塞推动粉末上升，回收粉末的容器内活塞下降，带动铺料滚筒在已烧结层上面铺上一层均匀密实的粉末，激光束烧结新的一层，与前一层烧结在一起，如此反复，直到完成整体烧结。

(3) 分层实体制造(Laminated Object Manufacturing，LOM)是美国 Helises 公司的 Michael Feygin 于 1987 年研制成功的，1988 年获得美国专利。该方法以纸、塑料薄膜或复合材料膜为材料，由送进机构的递进器和收集器将薄层材料送入工作平台，利用激光在加工平面上根据零件的裁面形状进行切割，非零件部分切割成网格便于成形后去除废料，完毕后工作平台下降一个层的厚度，再由送进机构送入新的一层薄层材料，进行激光加工，并由热棍在每层加热加压贴紧。就这样一层层加工最终完成实体模型。

(4) 熔化沉积造型(Fused Deposition Modeling，FDM)是美国学者 Dr Scott Crump 于 1988 年研制成功的。FDM 方法的特点是不使用激光，而是用电加热的方法加热材料丝。材料丝在喷嘴中加热变为黏性流体，这种连续黏性材料流通过喷嘴滴在基体上，经过自然冷却，形成固态薄层。从理论上来说，热熔材料都可以用来作 FDM 的原材料。

(5) 三维印制(3 Dimensional Printing，3DP)方法是美国麻省理工学院(MIT)Emanuel Sacha 和 Michael Cima 等人研制出来的。该方法可用于陶瓷粉末和金属粉末。其原理是用喷头将硅胶等粘接剂喷于粉末薄层上，粘结制成薄层，逐层累加，制成零件。

(6) 直接激光制造(Direct Laser Fabrication，DLF)提供了单步的、不浪费材料的工艺方法。事先在计算机上对三维 CAD 模型进行分层切片，得到每一层切片的数据文件。成形时采用送粉或送材料丝的方式，将粉末或材料丝以一定的控制速度由送粉装置(送丝装置)送到激光焦点所在的位置熔化，通过分层 CAD 文件控制数控工作台的移动和 Z 方向的送粉机构，实现逐点逐线激光熔覆，获得一个熔覆截面。一个熔覆过后，激光头上升(或工作台下降)一定高度，再熔覆第二层。使第二层与第一层冶金结合在一起。就这样不断层叠，获取所需的三维零件。这种方法不需要任何粘结剂，可以制作 100%密度显微结构的金属零件。

3) 几种典型的近净尺寸成形工艺

随着资源保护和环境保护的呼声越来越高，近净尺寸成形这种清洁化生产技术必将得到快速发展。

(1) 粉末冶金是一种精密成形工艺，成品件可以达到相当高的精度和表面粗糙度，可以不经任何后续加工直接应用，也可以进行一定的精加工。几种比较新的粉末压制方法包括：磁动力压制、爆炸压制、新的挤压成形法、吹气装粉法、温压等方法。

(2) 精密洁净铸造。先进铸造技术以熔体洁净、铸件组织细密(性能高)和表面光洁、尺寸精度高为主要特征，可简称为精密洁净铸造成形工艺。精密洁净铸造是采用各种特殊的工艺方法实现的。

压力铸造：压力铸造是在高压作用下，将金属熔液以较高的速度压入高精度的型腔内，力求在压力下快速凝固，以获得优质铸件的高效率铸造方法。在有色金属的各种精密铸造工艺中，压力铸造所占的比例最大。

熔模铸造：熔模铸造的铸件质量可达铸件一级精度。熔模铸造常用于压型制造方法中，机械加工压型是用碳钢、铝、铜等材料制成的，导热性好，尺寸精确，粗糙度低，还可镀铬抛光，生产出的铸件质量很高。熔模铸造适用于生产批量大、精度要求高、难加工材料的零件。

陶瓷型铸造：陶瓷型铸造是用陶瓷浆作为造型材料，灌浆成形，经高温焙烧后，再进行合箱，浇注金属液，铸成零件。陶瓷型铸造的整体型适用于形状复杂的小铸型和各种型芯，薄壳型适用于中大铸型。

壳型铸造：壳型铸造用人造树脂作型砂粘结剂，型砂在硬化后具有很高的强度，故铸型可制成薄壁壳型，而型砂可制成空心的薄壁壳芯，由于成本高，壳型铸造常用于制造壳芯。

此外精密铸造中还有金属型铸造、真空密封造型、液态挤压铸造等精密成型工艺。

(3) 精密锻造。金属坯料加热到锻造温度，采用模锻方法实现精密成形是现代机械零件的重要成形方法之一，机械零件中很多承力件、保安件、传动件都采用了热锻成形工艺。精密锻造的工艺流程与热模锻工艺相比，通常需要增加精压工序，并且需要有制造精密锻模、无氧化或少氧化加热和冷却手段。另外，对备坯和后续切削加工常有特殊要求，一般用于难以切削加工或费工时的零件，以及对使用性能有较高要求的零件，如齿轮、涡轮扭曲叶片、航空零件、电器零件等。精密模锻件的尺寸误差约为普通锻件的 1/3，粗糙度 *Ra* 可达 3.2～0.8μm，不需机械加工或进行少量加工即可直接用来装配。精密锻造常用于齿轮和叶片的精密制造。

(4) 精密冲裁简称精冲，是一种先进制造技术，在一定条件下可取代切削加工，具有优质、高效、低耗、面广的特点，适合于组织自动化生产。精冲件的尺寸公差可达 IT7～IT8 级，剪切面粗糙度 *Ra* 可达 2.4～0.4μm，相当于磨削。和切削加工相比，精冲一般可提高工效 10 倍左右。

1.4　基准及其选择

制订工艺规程时，合理选择基准对保证零件精度，拟定加工顺序有很大影响，特别对于保证零件加工表面的位置精度尤为重要。而且还决定了工艺装备设计、制造的周期与费用。正确地选择各工序的定位基准是制订工艺规程的一个重要问题。

由于基准总是由零件上的具体表面来体现，因此基准的选择实际上是基面的选择。

1.4.1　基准的概念

基准就是“根据”的意思，也就是在零件上用来确定其他点、线、面的位置的那些点、

线、面。如果要计算和度量某些点、线、面的位置尺寸，基准就是计算和度量的起点和依据。根据基准的功能不同，可以分类如下。



1.4.2 设计基准

在零件图上用来确定其他点、线、面位置的基准，称为设计基准，即零件图纸上标注尺寸的起点。如图 1.12 所示的柴油机机身零件：平面 N 和孔 I 的位置是根据平面 M 决定的，所以平面 M 是平面 N 和孔 I 的设计基准。孔 II 、孔 III 的位置是根据孔 I 的中心线决定的，所以孔 I 的中心线是孔 II 、孔 III 的设计基准。图 1.13 所示的齿轮，它的内孔、外圆和分度圆的设计基准是齿轮的中心线。图 1.14 中，对尺寸 45mm 而言，圆柱面的下素线 D 是槽底面 C 的设计基准。

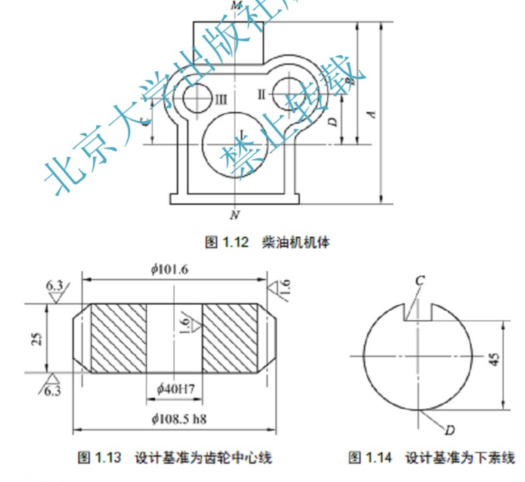


图 1.12 柴油机机体

图 1.13 设计基准为齿轮中心线

图 1.14 设计基准为下素线

1.4.3 工艺基准

在机械加工和装配过程中采用的各种基准，总称为工艺基准。按其用途的不同，又可分为原始基准、定位基准、度量基准及装配基准。

1. 原始基准(工序基准)

是在工序卡片(或其他工艺文件)上据以标定加工表面位置的点、线或面。加工表面位置的标定尺寸，称为原始尺寸。

图1.15所示为钻孔工序简图。这是被加工孔的原始基准的两种方案。原始基准不同，原始尺寸(20mm±0.1mm和15mm±0.1mm)也不相同。

如图1.16(a)所示，在加工齿轮毛坯的端面 E 及内孔 F 的工序中，B 面及轴线 OO 是 E 及 F 的原始基准，尺寸 a 及 ϕF 是原始尺寸。在图1.16(b)中，对于加工齿轮端面 D 及外圆 C 的工序来说，E 面及轴线 OO 是 D 及 C 的原始基准，尺寸 b 及 ϕC 是原始尺寸。原始基准和原始尺寸可用于工艺过程的任何一个工序中。

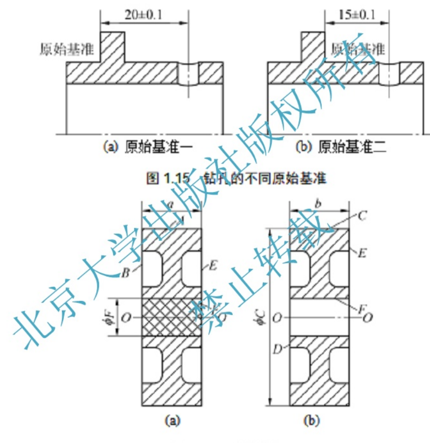


图1.15　钻孔的不同原始基准

图1.16　齿轮的加工

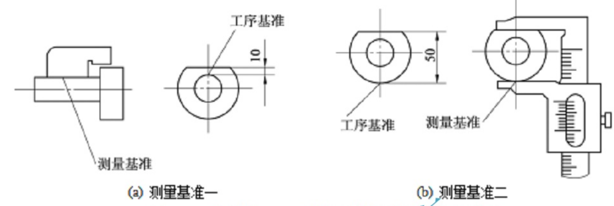
2. 定位基准

它是在加工中用作定位的基准。用夹具装夹时，定位基准就是工件上直接与夹具的定位元件相接触的点、线、面。如轴类零件的中心孔就用来作为轴的车、磨等工序的定位基准。从图1.16(a)可以看出，在加工齿轮端面 E 及内孔 F 的第一道工序中，由于是以毛坯外圆面 A 及端面 B 确定工件在夹具上的位置，A、B 面就是此工序的定位基准。图1.16(b)是加工齿轮端面 D 及外圆 C 的工序，用 E 及 F 确定工件的位置，E 及 F 是此工序的定位基准。

3. 度量基准

检验工件加工表面位置时所用的基准，称为度量基准。例如，在检验机床主轴时，以支承轴颈表面作度量基准。又如加工好的齿轮，装在心轴上检验齿圈相对内孔中心线的径

向跳动，此时的齿轮孔中心线就是度量基准。图 1.17 所示为检验被加工平面的位置时的两种不同的测量基准。



(a) 测量基准一　　(b) 测量基准二

图 1.17　检验被加工平面的位置时的两种不同的测量基准

4．装配基准

装配时用来确定零件或部件在产品中的位置所用的基准，称为装配基准。例如，装配齿轮时，齿轮孔以一定的配合精度安装在轴上，所以齿轮内孔表面就是装配基准。

特别提示

分析基准时应注意以下两点。

(1) 基准是依据的意思，必然都是客观存在的。有时，基准是轮廓要素，如圆柱面、平面等，这些基准比较直观，也易直接接触到；有时，基准是中心要素，如球心、轴线、中心平面等，它们不像轮廓要素那样摸得着、看得见，但它们却是客观存在的。随着测量技术的发展，总会把那些中心要素反映出来，圆度仪就是设法通过测量圆柱面来确定其客观存在的圆心。

(2) 基准要确切。要分清是圆柱面还是圆柱面的轴线，两者有所不同。为了使用上的方便，有时可以相互替代(不是体现)，但应引入替代后的误差。还要分清轴线的区段，如阶梯轴的轴线必定要说清哪段阶梯的轴线，不可笼统说明。

1.4.4　基准的选择

机械加工中基准的选择，主要是指定位基准的选择。这对加工精度有很大的影响。应该注意，作为基准的点或线，在工件上不一定具体存在，而常由某些具体表面来体现，例如在车床上用三爪卡盘夹持圆轴，实际定位表面是外圆柱面，而它所体现的基准是轴中心线，因此选择定位基准的问题常常就是选择定位基面的问题。零件加工的第一道工序只能用毛坯的铸造、锻造或轧制表面来作定位基准，这种基准称为粗基准。在以后的加工工序中应尽量采用已加工过的表面来作定位基准，这种基准称为精基准。有时，工件上没有能作为定位基准的恰当表面，有必要在工件上专门加工出一个定位基准，这个基准就称为辅助基准。辅助基准在零件功能上没有任何用处，它仅为加工的需要而设置。

1．粗基准的选择

粗基准选择时主要应保证各加工表面的余量均匀，以及加工面与不加工面之间有一定的相互位置精度，因此应考虑以下原则。

(1) 为了保证加工面与非加工面之间的位置要求，应选非加工面为粗基准。例如，图 1.18 所示的毛坯，铸造时孔 B 和外圆 A 有偏心。若采用非加工面(外圆 A)为粗基准加工孔 B，则加工后的孔 B 与外圆 A 的轴线是同轴的，即壁厚是均匀的，而孔 B 的加工余量不均匀。

当工件上有多个非加工面与加工面之间有位置要求时，则应以其中要求较高的非加工面为粗基准。如图 1.19 所示的活塞毛坯图，壁薄，要求沿圆周和顶面的壁厚均匀，质量对称，以保证活塞工作时的平稳性。所以要选择毛坯的内圆面和内顶面作为粗基准面，以保证加工后的外圆和顶面对内腔不加工面的壁厚均匀性。

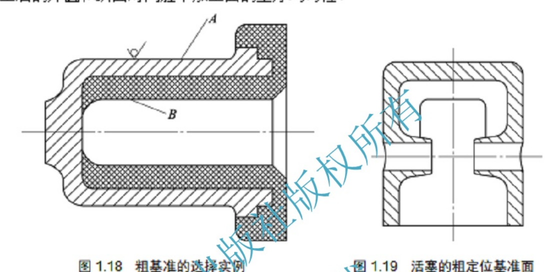


图 1.18　粗基准的选择实例　　　　图 1.19　活塞的粗定位基准面

(2) 分配余量原则。为了保证各加工面都有足够的加工余量，应当选择工件上加工质量要求较高且毛坯余量最小的面为粗基准。例如，图 1.20 所示的阶梯轴，因 ϕ55mm 外圆的余量较小，应选 ϕ55mm 外圆为粗基准，先加工 ϕ108mm 外圆到 ϕ100mm，然后再以车过的外圆为精基准面，加工 ϕ55mm 外圆到 ϕ50mm，这样可保证 ϕ50mm 外圆有足够的余量；反之，如果选 ϕ108mm 外圆为粗基准加工 ϕ50mm 外圆时，当两外圆有 3mm 的偏心时，则有可能因 ϕ50mm 的外圆余量不足而使工件报废。

(3) 为了保证重要加工面的余量均匀，应选重要加工面为粗基准。例如，床身加工时，为保证导轨面有均匀的金相组织和较高的耐磨性，应使其加工余量小而均匀。为此，应选择导轨面为粗基准加工床腿底面，如图 1.21(a)所示；然后，再以底面为精基准，加工导轨面，保证导轨面的加工余量小而均匀，如图 1.21(b)所示。

在箱体零件加工中，其中大孔的尺寸精度和位置精度要求均较高，为使加工时余量均匀，在划线时总是先以这些孔作粗基准，在大批大量生产中所用的夹具也常常以这些孔作粗基准。

(4) 粗基准应避免重复使用，在同一尺寸方向上(即同一自由度方向上)，通常只允许用一次。

粗基准是毛面，一般说来表面较粗糙，形状误差也大，如重复使用就会造成较大的定位误差。因此，粗基准应避免重复使用。如果希望以粗基准定位应首先把精基准加工好，为后续工序准备好精基准。

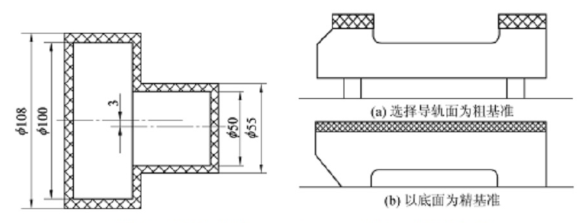


图 1.20　阶梯轴加工的粗基准选择　　图 1.21　床身加工的粗基准选择

例如图 1.22 所示的小轴，如重复使用毛坯面 B 定位去加工表面 A 和 C，则必然会使 A 与 C 表面的轴线产生较大的同轴度误差。

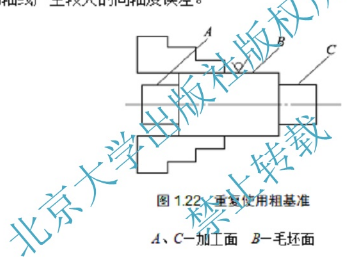


图 1.22　重复使用粗基准

A、C—加工面　B—毛坯面

(5) 选择作为粗基准的表面应尽可能平整光洁，不能有飞边、毛刺、浇冒口或其他缺陷，以使定位准确，夹紧可靠。当用夹具装夹时，选择的粗基准面还应使夹具结构简单、操作方便。

2. 精基准的选择

精基准的选择主要是从如何保证加工精度和安装方便来考虑，因此，选择精基准时一般应遵循以下原则。

1) 基准重合原则

应尽量选择零件的设计基准作为定位基准，这样可避免因基准不重合而引起的定位误差。如图 1.23(a)所示的工件，其大孔和底面已加工好，现需用钻模在工件上钻两个与大孔对称的小孔。若用图 1.23(b)的定位方式，即用底面和大孔中的菱形销定位，这时尺寸 A_1 不受尺寸 h 偏差的影响，就没有因基准不重合而引起的误差。

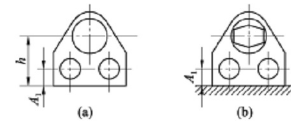


图 1.23　精基准的选择

图 1.24(a)为钻孔(图 1.24(b))前的工序。而图 1.24(c)、(d)、(e)为钻孔工序的 3 种不同的轴向定位方案。图 1.24(c)定位基准与工序基准重合，没有基准不重合误差。图 1.24(d)、图 1.24(e)定位基准与工序基准都不重合。图 1.24(d)所示为钻孔时工件以 *A* 面在夹具中定位，图 1.24(e)所示为钻孔时工件以 *C* 面在夹具中定位。对一批工件来说，工序基准 *B* 相对定位基准 *A*、*C* 可能的变动量为基准不重合误差，它将造成工序尺寸的变动。

设计基准与定位基准不重合而产生的基准不重合误差，是在加工的定位过程中产生的。定位过程中的基准不重合误差是在用夹具装夹、调整法加工一批工件时产生的。若用试切法加工，每一个尺寸都可直接测量，从而直接保证尺寸，就不存在基准不重合误差。

同样，基准不重合误差也可引申到其他基准不重合的场合。如装配基准与设计基准、设计基准与工序基准、工序基准与定位基准、工序基准与测量基准、设计基准与测量基准等基准不重合时，都会有基准不重合误差。如图 1.25 所示，两孔间的位置尺寸 *L* 在加工时或加工后一般均不能用游标卡尺等方能量具直接量出，因而一般只能量 L_1 或 L_2 来间接确定 *L*，这时工序基准与测量基准不重合。

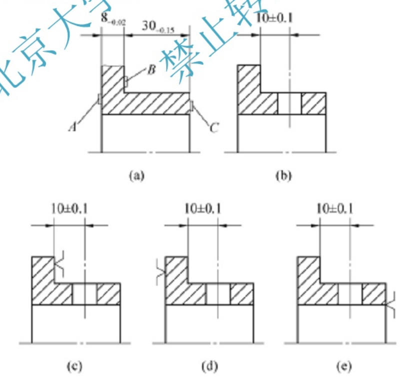


图 1.24　零件精基准选择

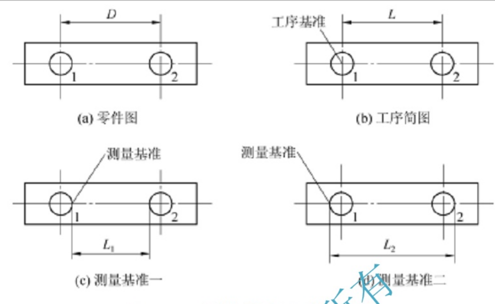


图 1.25　工序基准选择与测量基准不重合

2) 基准统一原则

当工件以某一精基准定位可以比较方便地加工其余各表面时应尽早地在开始几道工序中就把这个基准面加工出来并达到一定精度，以后各道工序(或大部分工序)都以它为精基准，此即所谓统一基准原则，也称基准单一原则或基准不变原则。

选作统一基准的表面一般都应是面积较大、精度较高的平面、孔以及其他距离较远的几个面的组合，参阅下面几个例子。

(1) 箱形零件一般都用一个较大的平面和两个距离较远的孔作精基准。没有孔的零件有时用大平面加两个与大平面垂直的边作精基准，或再专门加工出两个孔作精基准。

(2) 轴类零件一般常用两个顶尖孔作精基准。

(3) 圆盘类零件因有比较大的端面故常用一个端面加一个短孔作精基准。

(4) 如果零件有直径较大而长径比也较大(在 1.6 以上)的孔，则可用长孔加一个止推端面作精基准。

采用统一基准的原则有一系列的优点：它不但可以简化工艺过程的制定及统一夹具设计，而且还可以避免基准转换所带来的误差。但采用统一基准时并不排斥个别工序采用其他基准。例如，当统一基准与设计基准不重合时，可能因基准不重合误差而达不到图纸要求的位置或距离精度时，就应直接用设计基准定位来保证。采用基准统一原则时，若统一的基准面和设计基准一致，又符合基准重合原则，则此时既能获得较高的精度，又能减少夹具种类，这是最理想的方案。例如，图 1.16 所示的盘形齿轮，孔既是装配基准，又是设计基准。用孔作定位基准加工外圆、端面和齿面，既符合基准重合原则又符合基准统一原则。

若统一的基准面和设计基准不一致，遵循基准统一原则时，加工面之间的位置精度虽不如基准重合时那样高，即增加一个由辅助基准到设计基准之间的基准不重合误差，但是仍比基准多次转换时的精度高，因为多次转换基准会有多个基准不重合误差。

在自动线加工中，为了减少工件的装夹次数，也须遵循基准统一原则。

若采用一次装夹加工多个表面，那么多个表面间的位置尺寸及精度和定位基准的选择无关，而是取决于加工多个表面的各主轴及刀具间的位置精度和调整精度。

当采用基准统一原则后，无法保证表面间位置精度时，往往是先用基准统一原则，然后在最后工序用基准重合原则保证表面间的位置精度。例如，活塞加工时用内止口作基准加工所有表面后，最后采用基准重合原则，以活塞外圆定位加工活塞销孔，保证活塞外圆和活塞销孔的位置精度。

3) 自为基准原则

当某些表面精加工要求加工余量小而均匀时，选择加工表面本身作为定位基准称为自为基准原则。遵循自为基准原则时，不能提高加工面的位置精度，只是提高加工面本身的精度。

例如，图 1.26 所示是在导轨磨床上，以自为基准原则磨削床身导轨。方法是用百分表(或观察磨削火花)找正工件的导轨面，然后加工导轨面保证导轨面余量均匀，以满足对导轨面的质量要求。另外，如拉刀、浮动镗刀、浮动铰刀和珩磨等加工孔的方法，以及活塞销孔的滚压加工，都是自为基准的实例。

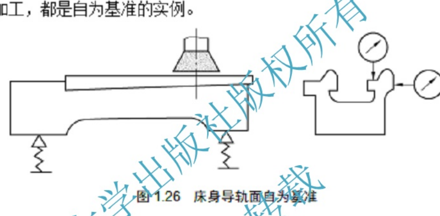


图 1.26　床身导轨面自为基准

4) 互为基准原则

当工件上两个加工表面之间的位置精度要求比较高时，又为了使其加工余量小而均匀，可采取反复加工、互为基准的原则。例如，加工精密齿轮时，用高频淬火把齿面淬硬后需进行磨齿，因齿面淬硬层较薄，所以要求磨削余量小而均匀。这时，就得先以齿面为基准磨孔，再以孔为基准磨齿面。从而保证齿面余量均匀，且孔和齿面又有较高的位置精度。又如图 1.27 所示的主轴前后支承轴颈与主轴锥孔间有严格的同轴度要求，常先以主轴锥孔为基准磨主轴前、后支承轴颈表面，然后再以前、后支承轴颈表面为基准磨主轴锥孔，最后达到图纸上规定的同轴度要求。

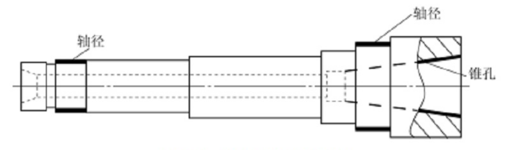


图 1.27　主轴零件精基准选择

5) 保证定位准确且夹紧可靠的原则

所选精基准应能保证工件定位准确、稳定，夹紧可靠。精基准应该是精度较高、表面粗糙度值较小、支承面积较大的表面。如图 1.28 所示工件，根据基准重合原则，加工表面

3 时，应以表面 1 为定位基准；加工表面 2 时，应以表面 3 为定位基准；但若以表面 3 定位加工表面 2(如图 1.28(b)所示)，因表面 3 的面积小，不易夹紧，并在切削力的作用下，工件容易松动或产生振动，安装也比较复杂，因此应以面积较大的表面 1 为定位基准(如图 1.28(a)所示)。这样，工件的安装可靠而且方便，但违反了基准重合的原则。在这种情况下，安装的可靠性为主要矛盾，故仍以表面 1 定位，否则因安装不可靠而引起的误差将超过基准不重合所引起的误差。至于因基准不重合而引起的定位误差，可通过尺寸换算加以控制(见第 6 章)。

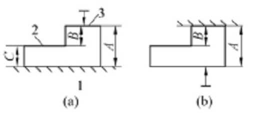


图 1.28　工件的定位夹紧方式

1—大表面　2—加工表面　3—小平面

特别提示

粗、精基准选择的各条原则，都是从不同方面提出的要求。有时，这些要求会出现相互矛盾的情况，甚至在一条原则内也会存在相互矛盾的情况，这就要求全面辩证地分析，分清主次，解决主要矛盾。

例如，在选择箱体零件的粗基准时，既要保证主轴孔和内腔壁(加工面与非加工面)的位置要求，又要求主轴孔的余量足够且均匀，或者要求孔系中各孔的余量都足够且均匀，就会产生相互矛盾的情况。此时，要在保证加工质量的前提下，结合具体生产类型和生产条件，灵活运用各条原则。当中、小批生产或箱体零件的毛坯精度较低时，常用划线找正装夹，兼顾各项要求，解决几方面矛盾。

1.5　工艺路线的拟定

拟定工艺路线的主要内容，除选择定位基准外，还应包括选择各加工表面的加工方法、安排工序的先后顺序、确定工序的集中与分散程度以及选择设备与工艺装备等，它是制订工艺规程的关键阶段。设计者一般应提出几种方案，通过分析对比，从中选择最佳方案。关于工艺路线的拟定，目前还没有一套精确的计算方法，而是采用经过生产实践总结出的一些带有经验性和综合性的原则。在应用这些原则时，要结合具体生产类型和生产条件灵活应用。

1.5.1　表面加工方法的选择

为了正确选择加工方法，应了解各种加工方法的特点和掌握加工经济精度和经济表面粗糙度的概念。

1. 加工经济精度和经济表面粗糙度的概念

加工过程中，影响精度的因素很多。每种加工方法在不同的工作条件下，所能达到的精度会有所不同。例如，精细地操作，选择较低的切削用量，就能得到较高的精度。但是，这样会降低生产率，增加成本。反之，如增加切削用量而提高了生产效率，虽然成本能降低，但会增加加工误差而使精度下降。

由统计资料表明，各种加工方法的加工误差和加工成本之间的关系呈负指数函数曲线形状，如图 1.29 所示。图中横坐标是加工误差Δ。沿横坐标的反方向即加工精度，纵坐标是

成本 Q。由图 1.29 可知，如每种加工方法欲获得较高的精度(即加工误差小)，则成本就要加大；反之，精度降低，则成本下降。但是，上述关系只是在一定范围内，即曲线之 AB 段才比较明显。在 A 点左侧，精度不易提高，且有一极限值 Δj；在 B点右侧，成本不易降低，也有一极限值 Q_j。曲线 $A\ B$段的精度区间属经济精度范围。

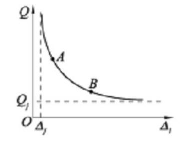


图 1.29　加工误差和成本的关系

加工经济精度是指在正常加工条件下(采用符合质量标准的设备、工艺装备和标准技术等级的工人，不延长加工时间)所能保证的加工精度。若延长加工时间，就会增加成本，虽然精度能提高，但不经济了。

各种加工方法所能达到的经济精度和经济表面粗糙度等级，以及各种典型表面的加工方法均已制成表格，在机械加工的各种手册中都能找到。表 1-13、表 1-14 和表 1-15 分别摘录了外圆、孔和平面等典型表面的加工方法及其经济精度(经济精度以公差等级表示)和表面粗糙度，供选用时参考。

特别提示

还须指出，经济精度的数值不是一成不变的，随着科学技术的发展，工艺的改进和设备及工艺装备的更新，加工经济精度会逐步提高。

表 1-13　外圆柱面加工方法

序号	加工方法	经济精度(以公差等级表示)	表面粗糙度 Ra/μm	适用范围
1	粗车	IT11～IT13	12.5～50	适用于淬火钢以外的各种金属
2	粗车－半精车	IT8～IT10	3.2～6.3	
3	粗车－半精车－精车	IT7～IT8	0.8～1.6	
4	粗车－半精车－精车－滚压(或抛光)	IT7～IT8	0.025～0.2	
5	粗车－半精车－磨削	IT7～IT8	0.4～0.8	主要用于淬火钢，也可用于未淬火钢，但不宜加工有色金属
6	粗车－半精车－粗磨－精磨	IT6～IT7	0.1～0.4	
7	粗车－半精车－粗磨－精磨－超精加工	IT5	0.012～0.1	
8	粗车－半精车－精车－精细车(金刚车)	IT6～IT7	0.025～0.4	主要用于要求较高的有色金属加工
9	粗车－半精车－粗磨－精磨－超精磨	IT5 以上	0.006～0.025	极高精度的外圆加工
10	粗车－半精车－粗磨－精磨－研磨	IT5 以上	0.006～0.1	

表 1-14　孔加工方法

序号	加工方法	经济精度(以公差等级表示)	表面粗糙度 Ra/μm	适用范围
1	钻	IT11～IT13	12.5	适用于加工未淬火钢及铸铁的实心毛坯，也可用于加工有色金属。孔径小于 15～20mm
2	钻－铰	IT8～IT10	1.6～6.3	
3	钻－粗铰－精铰	IT7～IT8	0.8～1.6	
4	钻－扩	IT10～IT11	6.3～12.5	加工未淬火钢及铸铁的实心毛坯，也可用于加工有色金属。孔径大于 15～20mm
5	钻－扩－铰	IT8～IT9	1.6～3.2	

续表

序号	加工方法	经济精度(以公差等级表示)	表面粗糙度 Ra/μm	适用范围
6	钻－扩－粗铰－精铰	IT7	0.8～1.6	
7	钻－扩－机铰－手铰	IT6～IT7	0.2～0.4	
8	钻－扩－拉	IT7～IT9	0.1～0.6	大批大量生产
9	粗镗(或扩孔)	IT11～IT13	6.3～12.5	除淬火钢外的各种材料，毛坯有铸出孔或锻出孔
10	粗镗(粗扩)－半精镗(精扩)	IT9～IT10	1.6～3.2	
11	粗镗(粗扩)－半精镗(精扩)－精镗(铰)	IT7～IT8	0.8～1.6	
12	粗镗(粗扩)－半精镗(精扩)－精镗－浮动镗刀精镗	IT6～IT7	0.4～0.8	
13	粗镗(扩)－半精镗－磨孔	IT7～IT8	0.2～0.8	主要用于淬火钢，也可用于未淬火钢，但不宜用有色金属
14	粗镗(扩)－半精镗－粗磨－精磨	IT6～IT7	0.1～0.2	
15	粗镗－半精镗－精镗－精细镗(金刚镗)	IT6～IT7	0.05～0.4	主要用于精度要求高的有色金属加工
16	钻－(扩)－粗铰－精铰－珩磨；钻－扩－拉－珩磨；粗镗－半精镗－精镗－珩磨	IT6～IT7	0.025～0.2	精度要求很高的孔
17	以研磨代替上述方法中的珩磨	IT5～IT6	0.006～0.1	

表 1-15　平面加工方法

序号	加工方法	经济精度(以公差等级表示)	表面粗糙度 Ra/μm	适用范围
1	粗车	IT11～IT13	12.5～50	端面
2	粗车－半精车	IT8～IT10	3.2～6.3	
3	粗车－半精车－精车	IT7～IT8	0.8～1.6	
4	粗车－半精车－磨削	IT6～IT8	0.2～0.8	
5	粗刨(或粗铣)	IT11～IT13	6.3～25	一般不淬硬平面(端铣表面粗糙度 Ra 值较小)
6	粗刨(或粗铣)－精刨(或精铣)	IT8～IT10	1.6～5.3	
7	粗刨(或粗铣)－精刨(或精铣)－刮研	IT6～IT7	0.1～0.8	精度要求较高的不淬硬平面，批量较大时宜采用宽刃精刨方案
8	以宽刃精刨代替上述刮研	IT7	0.2～0.8	
9	粗刨(或粗铣)－精刨(或精铣)－磨削	IT7	0.2～0.8	精度要求高的淬硬平面或不淬硬平面
10	粗刨(或粗铣)－精刨(或精铣)－粗磨－精磨	IT6～IT7	0.025～0.4	
11	粗铣－拉	IT7～IT9	0.2～0.8	大量生产，较小的平面
12	粗铣－精铣－磨－研磨	IT5 以上	0.006～0.1	高精度平面

2. 选择加工方法时考虑的因素

选择加工方法时常常根据经验或查表来确定，再根据实际情况或通过工艺试验进行修

改。从表 1-13 及表 1-14、1-15 中的数据可知，满足同样精度要求的加工方法有若干种，所以选择时还应考虑下列因素。

(1) 工件材料的性质。例如，淬火钢的精加工要用磨削，有色金属的精加工为避免磨削时堵塞砂轮，则要用高速精细车或精细镗(金刚镗)。

(2) 工件的形状和尺寸。例如，对于公差为 IT7 的孔采用镗、铰、拉和磨削等都可以，但是，箱体上的孔一般不宜采用拉或磨，而常常选择镗孔(大孔时)或铰孔(小孔时)，而直径大于 60mm 的孔不宜采用钻、扩、铰等。

(3) 考虑生产类型及生产率和经济性问题。选择加工方法要与生产类型相适应。大批大量生产应选用生产率高和质量稳定的加工方法。例如，平面和孔采用拉削加工，单件小批生产则采用刨削、铣削平面和钻、扩、铰孔；又如为保证质量可靠和稳定，保证有高的成品率，在大批大量生产中采用珩磨和超精加工加工较精密零件，常常降级使用高精度方法。同时，由于大批大量生产能选用精密毛坯，如用粉末冶金制造液压泵齿轮，精锻锥齿轮，精铸中、小零件等，因而可简化机械加工，在毛坯制造后直接进入磨削加工。

(4) 具体生产条件。应充分利用现有设备和工艺手段，发挥群众的创造性，挖掘企业潜力。有时，因设备负荷的原因，需改用其他加工方法。

(5) 充分考虑利用新工艺、新技术的可能性，提高工艺水平。

(6) 特殊要求。如表面纹路方向的要求，铰削和镗削孔的纹路方向与拉削的纹路方向不同，应根据设计的特殊要求选择相应的加工方法。

1.5.2 加工阶段的划分

工件的加工质量要求较高时，都应划分阶段。一般可分为粗加工、半精加工和精加工 3 个阶段。加工精度和表面质量要求特别高时，还可增设光整加工阶段。

1. 各加工阶段的主要任务

(1) 粗加工阶段：其任务主要是高效率地去除各表面的大部分余量，因此主要问题是如何获得高的生产率。在这个阶段中，精度要求不高。切削用量、切削力、切削功率都较大，切削热以及内应力等问题较突出。

(2) 半精加工阶段：其任务是使各次要表面达到图样要求，使各主要表面消除粗加工时留下的误差，达到一定的精度为精加工作准备。是在粗加工和精加工之间所进行的切削加工过程。

(3) 精加工阶段：其任务是保证各主要表面达到图样规定的质量要求。在这个阶段中，加工精度要求较高，各表面的加工余量和切削用量一般均较小。

(4) 光整加工阶段：对于精度要求很高、表面粗糙度参数值要求很小(标准公差 6 级及 6 级以上，表面粗糙度 $Ra \leqslant 0.32\mu m$)的零件；还要有专门的光整加工阶段。光整加工阶段以提高加工的尺寸精度和降低表面粗糙度为主。

有时，由于毛坯余量特别大，表面特别粗糙，在粗加工前还要有去皮加工阶段。为了及时发现毛坯废品以及减少运输工作量，常把去皮加工放在毛坯准备车间进行。

特别提示

光整加工阶段的主要任务是降低表面粗糙度，或进一步提高尺寸精度和形状精度，但一般不能纠正表面间位置误差。

2．划分加工阶段的原因

(1) 保证加工质量。工件加工划分阶段后，由于粗加工的加工余量大、切削力和所需的夹紧力也较大，因而工艺系统受力变形和热变形都比较严重，而且毛坯制造过程因冷却速度不均使工件内部存在着内应力，粗加工从表面切去一层金属，致使内应力重新分布也会引起变形，这就使得粗加工不仅不能得到较高的精度和较小的表面粗糙度，还可能影响其他已经精加工过的表面。粗精加工分阶段进行，就可以避免上述因素对精加工表面的影响，有利于保证加工质量。

(2) 有利于合理使用设备。粗加工要求使用功率大、刚性好、生产率高、精度要求不高的设备。精加工要求使用精度高的设备。划分加工阶段后，就可充分发挥粗、精加工设备的特点，避免以精干粗，做到合理使用设备。

(3) 便于安排热处理工序，使冷、热加工工序配合得更好。例如，粗加工后工件残余应力大，可安排时效处理，消除残余应力；热处理引起的变形又可在精加工中消除等。

(4) 便于及时发现毛坯缺陷。毛坯的各种缺陷如气孔、砂眼和加工余量不足等，在粗加工后即可发现，便于及时修补或决定报废，以免继续加工后造成工时和费用的浪费。

(5) 精加工、光整加工安排在后，可保护精加工和光整加工过的表面少受磕碰损坏。

上述划分加工阶段并非所有工件都应如此，在应用时要灵活掌握。例如：对于那些加工质量要求不高、刚性好、毛坯精度较高、余量小的工件，就可少划分几个阶段或不划分阶段；对于有些刚性好的重型工件，由于装夹及运输很费时，也常在一次装夹下完成全部粗、精加工。为了弥补不分阶段带来的缺陷，重型工件在粗加工工步后，松开夹紧机构，让工件有变形的可能，然后用较小的夹紧力重新夹紧工件，继续以精加工工步加工。

特别提示

应当指出，划分加工阶段是对整个工艺过程而言的，因而应以工件的主要加工面来分析，不应以个别表面(或次要表面)和个别工序来判断。

1.5.3　工序集中与分散

工序集中与工序分散是拟定工艺路线时确定工序数目(或工序内容多少)的两种不同的原则，它和设备类型的选择有密切的关系。

1．工序集中和工序分散的概念

工序集中就是将工件的加工集中在少数几道工序内完成。每道工序的加工内容较多。工序集中可采用技术上的措施集中，称为机械集中，如多刃、多刀和多轴机床、自动机床、数控机床、加工中心等；也可采用人为的组织措施集中，称为组织集中，如卧式车床的顺序加工。工序分散就是将工件的加工分散在较多的工序内进行。每道工序的加工内容很少，最少时即每道工序仅一个简单工步。

2．工序集中和工序分散的特点

1) 工序集中的特点(指机械集中)

(1) 采用高效专用设备及工艺装备，生产率高。

(2) 工件装夹次数减少，易于保证表面间位置精度，还能减少工序间运输量，缩短生产周期。

(3) 工序数目少，可减少机床数量、操作工人数和生产面积，还可简化生产计划和生产组织工作(本特点也适用于组织集中)。

(4) 因采用结构复杂的专用设备及工艺装备，使投资量大，调整和维修复杂，生产准备工作量大，转换新产品比较费时。

2) 工序分散的特点

(1) 设备及工艺装备比较简单，调整和维修方便，工人容易掌握，生产准备工作量少，又易于平衡工序时间，易适应产品更换。

(2) 可采用最合理的切削用量，减少基本时间。

(3) 设备数量多，操作工人多，占用生产面积也大。

3. 工序集中与工序分散的确定

在制订机械加工工艺规程时，恰当地选择工序集中与分散的程度是十分重要的。工序集中与工序分散各有利弊，应根据生产类型、现有生产条件、工件结构特点和技术要求等进行综合分析后确定最佳方案。

当前机械加工的发展方向趋向于工序集中。在单件小批生产中，常常将同工种的加工集中在一台普通机床上进行，以避免机床负荷不足。在大批大量生产中，广泛采用各种高生产率设备使工序高度集中，而数控机床尤其是加工中心机床的使用使多品种中小批量生产几乎全部采用了工序集中的方案。但对于某些零件，如活塞、轴承等，采用工序分散仍然可以体现较大的优越性。因分散加工的各个工序可以采用效率高而结构简单的专用机床和专用夹具，投资少又易于保证加工质量，同时也方便按节拍组织流水生产，故常常采用工序分散的原则制订工艺规程。

对于重型零件，为了减少工件装卸和运输的劳动量，工序应适当集中；对于刚性差且精度高的精密工件，则工序应适当分散。


知识链接

加工中心机床

多品种中小批量生产中，越来越多地使用加工中心机床，便是一个工序集中的典型例子。

加工中心是在普通数控机床的基础上发展起来的。它是在普通数控机床上加装一个刀库(可容纳10~100多把刀具)和自动换刀装置而构成的一种具有自动换刀功能的数控机床，工件经一次装夹后，加工中心可自动地更换刀具，连续对工件各加工面自动地完成铣、镗、钻、铰、攻丝等多工序加工，因此加工中心具有更高的自动化程度、更高的加工效率和更高的加工精度。为了进一步减少上下料的辅助时间，有些加工中心还带有自动交换工作台，这样相对于普通数控机床，加工中心零件加工的辅助时间大大缩短，生产过程的连续性得到了空前的提高，机床的工艺性和加工的精度也达到了前所未有的高度，由于加工范围大，应用面广，生产率高，加工中心已成为数控机床的典型代表。随着高速切削技术的发展和单元技术的成熟，高速加工中心的应用越来越广泛。图1.30所示即是五轴联动龙门加

工中心。机床采用定梁式龙门结构，主轴具有可回转的轴，可实现五轴联动进行空间曲面加工及大型复杂形状模具的高速高效加工。机床主轴采用电主轴结构，最高转速可达 10000 转/分。其基础大件按高刚性高抗震性要求设计。按用户要求可配置光栅，实现闭环控制。



图 1.30　五轴联动龙门加工中心机床

1.5.4　加工顺序的安排

复杂工件的机械加工工艺路线中要经过切削加工、热处理和辅助工序。因此在拟定工艺路线时，工艺人员要全面地把切削加工、热处理和辅助工序三者一起加以考虑。

1．机械加工工序的安排原则

1) 先基面后其他原则

工艺路线开始安排的加工表面，应该是选作后续工序作为精基准的表面，然后再以该基准面定位，加工其他表面。如轴类零件第一道工序一般为铣端面钻中心孔，然后以中心孔定位加工其他表面。再如箱体零件常常先加工基准平面和其上的两个小孔，再以一面两孔为精基准，加工其他平面。

2) 先粗后精原则

如前所述，对于精度要求较高的零件，先安排粗加工，中间安排半精加工，最后安排精加工和光整加工。这一点对于刚性较差的零件，尤其不能忽视。

3) 先面后孔原则

当零件上有较大的平面可以用来作为定位基准时，总是先加工平面，再以平面定位加工孔，保证孔和平面之间的位置精度。这样定位比较稳定，装夹也方便。同时若在毛坯表面上钻孔，钻头容易引偏，所以从保证孔的加工精度出发，也应当先加工平面再加工该平面上的孔。

当然，如果零件上并没有较大的平面，它的装配基准和主要设计基准是其他的表面，

此时就可以运用上述第一个原则，先加工其他的表面。如变速箱拨叉零件就是先加工长孔，再加工端面和其他小平面的。

4) 先主后次原则

零件上的加工表面一般可以分为主要表面和次要表面两大类。主要表面通常是指位置精度要求较高的基准面和工作表面；而次要表面则是指那些要求较低，对零件整个工艺过程影响较小的辅助表面，如键槽、螺孔、紧固小孔等。这些次要表面与主要表面间也有一定的位置精度要求，一般是先加工主要表面，再以主要表面定位加工次要表面。对于整个工艺过程而言，次要表面的加工一般安排在主要表面最终精加工之前。

在安排加工顺序时，要注意退刀槽、倒角等工作的安排。有关这一类结构元素，在审查图纸的结构工艺性时就应予以注意。

为保证加工质量要求，有些零件的精加工须放在部件装配之后或在总装过程中进行。

特别提示

在安排机械加工工序时，要求全面辩证地分析，分清主次，合理地使用各条原则。

2. 热处理工序的安排

制订工艺规程时，热处理工序在工艺路线中安排得是否恰当，对零件的加工质量和材料的使用性能影响很大，因此应当根据零件的材料和热处理的目的妥善安排。安排热处理工序的主要目的是用于提高材料的力学性能，改善金属的加工性能以及消除残余应力。常见的热处理工序有以下几个。

(1) 预备热处理——安排在机械加工之前，以改善切削性能，消除毛坯制造时的内应力为主要目的。例如，对于含碳量超过 0.5%的碳钢，一般采用退火，以降低硬度；对于含碳量不大于 0.5%的碳钢，一般采用正火，以提高材料的硬度。使切削时切屑不粘刀，表面较光滑。由于调质(淬火后再进行 500～650℃的高温回火)能得到组织细密均匀的回火索氏体，因此有时也用作预备热处理。

(2) 最终热处理——安排在半精加工以后和磨削加工之前(但氮化处理应安排在精磨之后)。主要用于提高材料的强度及硬度，如淬火—回火。由于淬火后材料的塑性和韧性很差，有很大的内应力，容易开裂，组织不稳定，材料的性能和尺寸要发生变化等原因，所以淬火后必须进行回火。其中调质处理能使钢材既获得一定的强度、硬度，又有良好的冲击韧性等综合机械性能，常用于汽车、拖拉机和机床零件，如汽车半轴、连杆、曲轴、齿轮和机床主轴等。

(3) 去除内应力处理——最好安排在粗加工之后、精加工之前。如人工时效、退火。但是为了避免过多的运输工作量，对于精度要求不太高的零件，一般把去除内应力的人工时效和退火放在毛坯进入机械加工车间之前进行。但是对于精度要求特别高的零件(例如，精密丝杠)，在粗加工和半精加工过程中要经过多次去除内应力退火，在粗、精加工过程中还要经过多次人工时效。

另外，对于机床的床身、立柱等铸件，常在粗加工前以及粗加工后进行自然时效(或人工时效)，以消除内应力，并使材料的组织稳定，不再在以后继续变形。所谓自然时效，就是把铸件在露天放置几个月甚至几年。所谓人工时效，就是把铸件以 50～100℃/h 的速度加热到 500～550℃，保温 3～5h 或更久，然后以 20～50℃/h 的速度随炉冷却。虽然目前机

床铸件已多采用人工时效来代替自然时效，但是对精密机床的铸件来说，仍以采用自然时效为好。

对于精密零件(如精密丝杠、精密轴承、精密量具、油泵油嘴偶件)为了消除残余奥氏体，使尺寸稳定不变，还要采用冰冷处理(在 0～80℃之间的空气中停留 1～2h)。冰冷处理一般安排在回火之后进行。

3. 辅助工序的安排

辅助工序的种类较多，包括检验、去毛刺、倒棱、清洗、防锈、去磁及平衡等。辅助工序也是必要的工序，若安排不当或遗漏，将会给后续工序和装配带来困难，影响产品质量，甚至使机器不能使用。例如，未去净的毛刺将影响装夹精度、测量精度、装配精度以及工人安全；润滑油中未去净的切屑，将影响机器的使用质量；研磨、珩磨后没清洗过的工件会带入残存的砂粒，加剧工件在使用中的磨损；用磁力夹紧的工件没有安排去磁工序，会使带有磁性的工件进入装配线，影响装配质量。因此，要重视辅助工序的安排。辅助工序的安排不难掌握，问题是常被遗忘。

检验工序更是必不可少的工序。它对保证质量、防止产生废品起到重要作用。除了工序中自检外，需要在下列场合单独安排检验工序。

(1) 粗加工阶段结束后。

(2) 重要工序前后。

(3) 送往外车间加工的前后。

(4) 特种性能(磁力探伤、密封性等)检验之前。有些特殊的检验，如探伤等检查工件的内部质量，一般都安排在精加工阶段。密封性检验、工件的平衡和重量检验，一般都安排在工艺过程最后进行。

(5) 全部加工工序完成后。

1.5.5 设备与工艺装备的选择

1. 设备的选择

确定了工序集中或工序分散的原则后，基本上也就确定了设备的类型。如采用机械集中，则选用高效自动加工的设备，多刀、多轴机床；若采用组织集中，则选用通用设备，若采用工序分散，则加工设备可较简单。此外，选择设备时还应考虑以下几点。

(1) 机床精度与工件加工精度相适应。

(2) 机床规格与工件的外部形状、尺寸相适应。

(3) 采用数控机床加工的可能性。在中小批量生产中，对于一些精度要求较高、工步内容较多的复杂工序，应尽量考虑采用数控机床加工。

(4) 机床的选择应与现有生产条件相适应。选择机床应当尽量考虑到现有的生产条件，除了新厂投产以外，原则上应尽量发挥原有设备的作用，并尽量使设备负荷平衡。

如果工件的尺寸特大或工件的精度特高，这时很可能没有相应的设备可供选用，在这种情况下需改装设备或设计专用机床。为此应根据具体要求提出设计任务书。其中，应提出与加工工序内容有关的必要参数、所要求的生产率、保证产品质量的技术条件以及机床的总体布置形式等。各种机床的规格和技术性能可查阅有关的手册或机床说明书。

2. 工艺装备的选择

工艺装备选择的合理与否，将直接影响工件的加工精度、生产效率和经济性。应根据生产类型、具体加工条件、工件结构特点和技术要求等选择工艺装备。

1) 夹具的选择

单件小批生产首先采用各种通用夹具和机床附件，如卡盘、机床用平口虎钳、分度头等。有组合夹具站的，可采用组合夹具。对于中、大批和大量生产，为提高劳动生产率而采用专用高效夹具。中、小批生产应用成组技术时，可采用可调夹具和成组夹具。

2) 刀具的选择

合理地选用刀具，是保证产品质量和提高切削效率的重要条件。在选择刀具形式和结构时，应考虑以下主要因素。

(1) 生产类型和生产率：单件小批生产时，一般尽量选用标准刀具。大批大量生产中广泛采用专用刀具、复合刀具等，以获得高的生产率。

(2) 工艺方案和机床类型：不同的工艺方案，必然要选用不同类型的刀具。例如，孔的加工，可以采用钻—扩—铰，也可以采用钻—粗镗—精镗等，显然所选用的刀具类型是不同的。机床的类型、结构和性能，对刀具的选择也有重要的影响。如立式铣床加工平面应选用立铣刀或面铣刀，而不会用圆柱铣刀等。

(3) 工件的材料、形状、尺寸和加工要求：刀具的类型确定以后，根据工件的材料和加工性质确定刀具的材料。工件的形状和尺寸有时将影响刀具结构及尺寸，譬如一些特殊表面(如T形槽)的加工，就必须选用特殊的刀具(如T形槽铣刀)。此外，所选的刀具类型、结构及精度等级必须与工件的加工要求相适应，如粗铣时应选用粗齿铣刀，而精铣时则选用细齿铣刀等。

3) 量具的选择

在选择量具前首先要确定各工序加工要求如何进行检测。工件的形位精度要求一般是依靠机床和夹具的精度而直接获得的，操作工人通常只检测工件的尺寸精度和部分形位精度。而表面粗糙度一般是在该表面的最终加工工序用目测方法来检验。但在专门安排的检验工序中，必须根据检验卡片的规定，借助量仪和其他的检测手段全面检测工件的各项加工要求。

选择量具时应使量具的精度与工件加工精度相适应，量具的量程与工件的被测尺寸大小相适应，量具的类型与被测要素的性质(孔或外圆的尺寸值还是形状位置误差值)和生产类型相适应。一般说来，单件小批生产广泛采用游标卡尺、千分尺等通用量具，大批大量生产则采用极限量规和高效专用量仪等。

各种通用量具的使用范围和用途，可查阅有关的专业书籍或技术资料，并以此作为选择量具时的参考依据。

如果需要设计专用工夹具量具时必须提出设计任务书，以夹具为例，其内容包括以下几点。

(1) 写出产品和零件的名称、编号和产量，并绘出工序简图，标明加工表面和工序尺寸及公差，说明加工技术要求。

(2) 说明工件的定位方式和装夹要求。

(3) 建议采用的夹具型式、操作使用方法和必要的注意事项。

(4) 说明有关的机床、刀具、切削条件、辅助工具等情况。

1.6 确定加工余量、工序尺寸及其公差

零件在机械加工工艺过程中，各个加工表面本身的尺寸及各个加工表面相互之间的距离尺寸和位置关系，在每一道工序中是不相同的，它们随着工艺过程的进行而不断改变，一直到工艺过程结束，达到图纸上所规定的要求。在工艺过程中，某工序加工应达到的尺寸称为工序尺寸。

工序尺寸的正确确定不仅和零件图上的设计尺寸有关系，还与各工序的工序余量有关系。

1.6.1 加工余量的确定

1. 加工余量的概念

加工余量是指在加工过程中，从被加工表面上切除的金属层厚度。加工余量分工序余量和加工总余量(毛坯余量)两种。相邻两工序的工序尺寸之差称为工序余量。毛坯尺寸与零件图的设计尺寸之差称为加工总余量(毛坯余量)，其值等于各工序的工序余量总和。

由于加工表面的形状不同，加工余量可分为单边余量和双边余量两种。如平面加工，加工余量为单边余量，即实际切除的金属层厚度。又如轴和孔的回转面加工，加工余量为双边余量，实际切除的金属层厚度为加工余量的一半。

任何加工方法加工后的尺寸变化都会有一定的误差。因此，需确定各种加工方法的工序尺寸公差(见《金属机械加工工艺人员手册》及有关资料)。对工序间公差带一般都规定为“入体”(指向工件材料体内)的方向，即对于被包容面(如轴、键宽等)，工序公差带都取上偏差为零，即加工后的基本尺寸与最大极限尺寸相等；对于包容面(如孔、键槽宽等)，工序间公差带都取下偏差为零，即加工后的基本尺寸和最小极限尺寸相等。但是要注意，毛坯尺寸的制造公差常取对称偏差标注。

根据上面所说的规定，我们可以作出如图 1.31 和图 1.32 所示的加工余量及其与工序尺寸公差的关系图。从图中可以看出下列关系。

(1) 加工总余量等于各工序余量之和，如下式所示。

$$Z_{总}=\sum_{i}^{n}Z_{i} \tag{1-2}$$

式中 n——工序数目。

(2) 对于被包容面而言，工序余量与工序基本尺寸关系如下。

工序余量=上工序的基本尺寸−本工序的基本尺寸。

工序最大余量=上工序的最大极限尺寸−本工序的最小极限尺寸。

工序最小余量=上工序的最小极限尺寸−本工序的最大极限尺寸。

(3) 对于包容面而言，工序余量与工序基本尺寸关系如下。

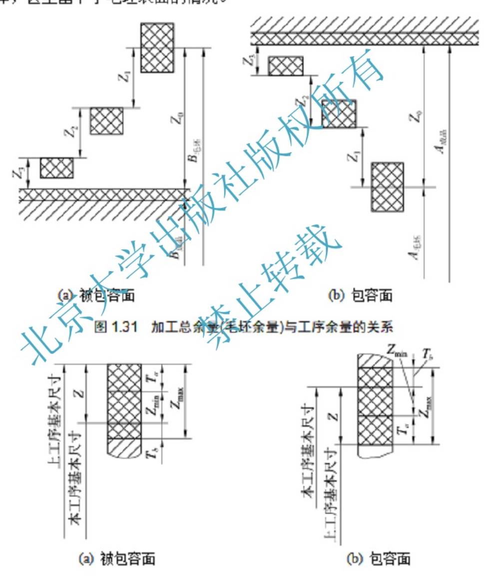
工序余量=本工序的基本尺寸−上工序的基本尺寸。

工序最大余量=本工序最大极限尺寸−上工序最小极限尺寸。

工序最小余量=本工序最小极限尺寸−上工序最大极限尺寸。

上面所说的工序间余量都是计算基本工序尺寸用的，所以又称为公称余量。

加工总余量的大小对制订工艺过程有一定的影响。总余量不够，不能保证加工质量；总余量过大，不但增加机械加工的劳动量而且也增加了材料、工具、电力等的消耗，从而增加了成本。加工总余量的数值，一般与毛坯的制造精度有关。同样的毛坯制造方法，总余量的大小又与生产类型有关，批量大，总余量就可小些。由于粗加工的工序间余量的变化范围很大，半精加工和精加工的加工余量较小，所以，在一般情况下，加工总余量总是足够分配的。但是在个别余量分布极不均匀的情况下，也可能发生毛坯上有缺陷的表面层都切削不掉，甚至留下了毛坯表面的情况。



(a) 被包容面　　(b) 包容面

图 1.31　加工总余量(毛坯余量)与工序余量的关系

(a) 被包容面　　(b) 包容面

图 1.32　加工总余量(毛坯余量)与工序尺寸公差示意

2．工序余量影响因素

影响工序间余量的因素比较复杂。下面仅对在一次切削中应切去的部分作一说明，作为考虑工序间余量的参考。

1) 上工序的表面粗糙度(R_{ya})

由于尺寸测量是在表面粗糙度的高峰上进行的，任何后续工序都应降低表面粗糙度，因此在切削中首先要把上工序所形成的表面粗糙度切去。

2) 上工序的表面破坏层(D_a)

由于切削加工都在表面上留下一层塑性变形层(如图 1.33 所示)，这一层金属的组织已被破坏，必须在本工序中予以切除。

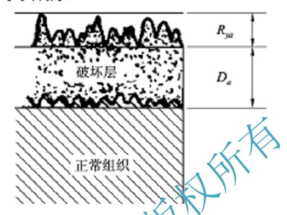


图 1.33　表面粗糙度和表面破坏层

经过加工，上工序的表面粗糙度及表面破坏层切除了，又形成了新的表面粗糙度和表面破坏层。但是根据加工过程中逐步减少切削层厚度和切削力的规律，本工序的表面粗糙度和表面破坏层的厚度必然比上工序为小。在光整加工中，上工序的表面粗糙度和表面破坏层是组成本工序加工余量的主要因素。

3) 上工序的尺寸公差(T_a)

从图 1.32 可以看出，在工序余量内包括上工序的尺寸公差。其形状和位置误差，一般都包括在尺寸公差范围内(例如：圆度一般包括在直径公差内，平行度一般包括在直径公差内)，不再单独考虑。

4) 上工序的形状和位置误差(ρ_a)

零件上有一些形状和位置误差不包括在尺寸公差的范围内，但这些误差又必须在加工中加以纠正，这时就必须单独考虑这类误差对加工余量的影响。属于这一类的误差有轴线的直线度、位置度、同轴度及平行度、轴线与端面的垂直度、阶梯轴或孔的同轴度、外圆对于孔的同轴度等。例如，图 1.34 所示的轴类零件的轴线有直线度误差 δ，则加工余量必须至少增加 2δ 才能保证该轴在加工后消除弯曲的影响，因此细长轴的加工余量应比用同样方法加工一般短轴的余量要大些，这就是考虑到细长轴因内应力而变形的缘故。

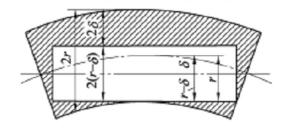


图 1.34　轴的弯曲对加工余量影响

热处理变形对加工余量的影响也是需要单独考虑的误差之一。淬火零件的磨削余量应

比不淬火零件的磨削余量要大些，这也是考虑到零件在淬火后有变形之故。对于孔、花键孔等，热处理可能使尺寸略有增大，或略有减少，影响到本工序的加工余量，甚至使花键孔扭转产生其他变形，影响到工艺过程的安排。热处理变形的数值与方向和零件的材料及热处理工艺有关，需要通过实验来决定。

5) 本工序的安装误差(ε_b)

这一项包括定位误差(包括夹具本身的误差)和夹紧误差。例如，如图1.35所示，若用三爪卡盘夹紧工件外圆磨内孔时，由于三爪卡盘本身定心的不准确，因而使工件轴心线和机床回转轴心线偏移了一个e值，使内孔的磨削余量不均匀。为了加工出内孔，就需在磨削余量上加大$2e$值。

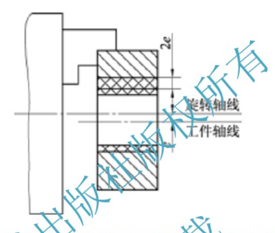


图1.35　三爪自定心卡盘装夹误差对加工余量的影响

3. 余量计算公式的应用

由于ρ_a和ε_b具有方向性，因此，它们的合成应为向量和。根据以上分析，可以建立工序最小余量的计算式。

对于平面加工，单边最小余量为：

$$Z_{b\min}=(R_{ya}+D_a)+(\rho_a+\varepsilon_b) \tag{1-3}$$

对于外圆和内孔加工，双边最小余量为：

$$Z_{b\min}=2\left[R_{ya}+D_a+\sqrt{\rho_a^{\ 2}+\varepsilon_b^{\ 2}}\right] \tag{1-4}$$

当具体应用这种计算式时，还应考虑该工序的具体情况。如车削安装在两顶尖上的工件外圆时，其装夹误差可取为零，此时直径上的双边最小余量为：

$$Z_{b\min}=2[(R_{ya}+D_a)+\rho_a] \tag{1-5}$$

对于浮动镗孔，由于加工中孔是本身导向的自为基准，不能纠正孔轴线的偏斜和弯曲，因此此时的直径双边最小余量为：

$$Z_{b\min}=2(R_{ya}+D_a) \tag{1-6}$$

对于研磨、珩磨、超精磨和抛光等光整加工工序，此时的加工要求主要是进一步减小上工序留下的表面粗糙度，因此其直径双边最小余量(仅减小表面粗糙度)为：

$$Z_{b\min}=2R_{ya} \tag{1-7}$$

计算中所需的R_{ya}、D_a、ε_b的数值，可参阅有关的工艺手册。

4. 确定加工余量的方法

实际生产中加工余量的确定，主要有 3 种方法。

1) 计算法

按照前面所述的影响余量的因素，逐一进行分析并计算，这样确定的余量比较准确，但必须有充分的统计分析资料和清楚各项因素对余量的影响程度。因为分析计算比较麻烦，一般情况下并不采用。

2) 查表法

在各种机械加工工艺手册上部有加工余量表，这些表格的数据来源于生产实践和实验研究，使用时可结合本厂实际加工情况进行一定的修正。这种方法方便、迅速，在生产中应用广泛。

3) 估计法

此法主要靠经验确定，不够准确。为了保证不出废品，余量往往偏大，多用于单件小批生产。

对于一些精加工工序(例如：磨削、研磨、珩磨、金刚镗等)，有一最合适的加工余量范围。加工余量过大，会使精加工工时过长，甚至不能达到精加工的目的(破坏了精度和表面质量)；加工余量过小，会使工件的某些部位加工不出来。此外，精加工的工序余量不均匀，还会影响加工精度。所以对于精加工工序的工序间余量的大小和均匀性必须予以保证。

1.6.2　切削用量的确定

正确地选用切削用量，对保证产品质量，提高切削效率和经济效益，具有重要作用。应综合考虑工件材料、加工精度和表面粗糙度要求、刀具寿命和机床功率等因素来选择确定。

单件小批生产中，在工艺文件上常不具体规定切削用量，而由操作工人根据具体情况确定。

在成批以上生产时，则应科学地、严格地选择切削用量，并把它写在工艺文件上，以充分发挥高效设备的潜力并控制加工时间和生产节拍。

选择切削用量的基本原则是：首先选取尽可能大的背吃刀量，然后根据机床动力和刚度条件(粗加工)或对加工表面粗糙度的要求(精加工)选取尽可能大的进给量，最后在刀具耐用度和机床功率允许的条件下选择合理的切削速度。

切削用量的选择方法可分为计算法和查表法。有关的公式和表格可查阅各种工艺手册。查表法简单、方便、实用，在生产中得到广泛的应用。

1.6.3　工序尺寸及其公差的确定

由于加工的需要，在工序图以及工艺卡上要标注一些专供加工用的尺寸，这类尺寸就称为工艺尺寸。工艺尺寸往往不是直接采用零件图上的尺寸，而需要另行计算。计算工艺尺寸是制订工艺过程的主要工作之一，通常可以有下列几种情况。

1. 基准不重合的尺寸换算

有关这一类计算的概念已在前面讲过。由于这种计算应用了尺寸链的原理，所以将在第 6 章“尺寸链”中再作讨论。

2. 工序尺寸的计算

对于简单的工艺尺寸(工艺基面不变换的情况)，在决定了各工序余量和工序所能达到的经济精度之后，就可以计算各工序的尺寸和公差。注意这种计算的顺序应由最后一道工序开始往前推算，举例如下。

【例 1-1】 某箱体零件，其上有一孔 $\phi 180J6_{-0.017}^{+0.018}$ mm，$Ra \leqslant 0.8$mm。已知其加工工艺过程为粗镗—半精镗—精镗—铰孔(用浮动镗刀块)。试计算该孔加工的各工序尺寸及公差。

解：查机械加工手册，查得各工序加工余量和所能达到的经济精度，见表 1-16 中第二、三列。

在此基础上进行计算，得各工序的最小极限尺寸和工序尺寸及极限偏差。其中关于毛坯的公差可根据毛坯的生产类型、结构特点、制造方法和生产厂家的具体条件，参照有关毛坯的手册资料确定。

表 1-16　工序尺寸及公差的计算

工序名称	工序双边余量/mm	工序的经济精度		最小极限尺寸/mm	工序尺寸及极限偏差/mm
		公差等级	公差值/mm		
铰孔	0.2	IT6	0.025	ϕ 179.983	$\phi 180_{-0.017}^{+0.018}$
精镗孔	0.6	IT7	0.04	ϕ 79.8	$\phi 179.8_{0}^{+0.014}$
半精镗孔	3.2	IT9	0.10	ϕ 179.2	$\phi 179.2_{0}^{+0.1}$
粗镗孔	6	IT11	0.25	ϕ 176	$\phi 176_{0}^{+0.25}$
毛坯孔	—	—	3	ϕ 168	$\phi 170_{-2}^{+1}$

当制订表面形状复杂的零件的工艺过程，或零件在加工过程中需要多次转换工艺基准或工艺尺寸需从待继续加工的表面标注时，工艺尺寸的计算就比较复杂了，这时就应利用尺寸链原理来分析和计算，并对工序余量进行验算以校核工序尺寸及其上下偏差。

3. 孔系坐标尺寸的计算

孔系的坐标尺寸，通常在零件图多已标注清楚。但也可能碰到坐标尺寸未完全标注的情况，这时就要计算孔系加工中用的孔系坐标尺寸。这类问题，也可运用尺寸链原理，作为一种平面尺寸链问题解算。

1.7　确定时间定额

工序设计中一个很重要的内容是确定劳动消耗工艺定额，简称劳动定额，它是劳动生产率指标。劳动定额可用产量定额(在一定生产条件下，规定每个工人在单位时间内应完成的合格品数量)或时间定额(在一定生产条件下，规定生产一件产品或完成一道工序所需消耗的时间)来表示。常用时间定额作为劳动定额指标。

1.7.1　时间定额的含义

时间定额是在一定生产条件下制订出完成某一工作(如某一零件、某一工序等)所需要

的时间，是生产计划和经济核算的主要依据之一。时间定额必须正确制订，且应具有一定的平均先进水平，过高或过低的定额均不利于提高生产水平。

完成零件加工时一个工序的时间定额，称为单件时间定额，其内容包括以下 5 项。

1. 基本时间 $T_基$

基本时间 $T_基$ 是直接改变工件的尺寸、形状和表面质量所需要的时间。

特别提示

对于切削加工来说，是切去金属所耗费的时间，包括切削工具的切入和切出时间。这个时间可根据行程长度和切削用量来进行计算。

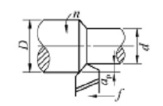


图 1.36　车削加工基本时间的计算

例如图 1.36 所示车削加工，其计算公式为

$$T_基 = \frac{(L+L_a+L_b)Z}{n\times f\times a_p} = \frac{L+L_a+L_b}{n\times f}\times i \tag{1-8}$$

式中　L——加工表面长度，mm；
L_a——刀具切入长度，mm；
L_b——刀具切出长度，mm；
n——工件转速，r/min；
f——进给量，mm/r；
a_p——切削深度，mm；
Z——加工余量，mm；
$i=Z/a_p$——走刀次数，取整数。

各种加工方法的基本时间计算公式，可在切削加工手册中查到。

2. 辅助时间 $T_辅$

辅助时间 $T_辅$ 是指每个工序中为保证完成基本工艺工作需要的辅助动作所耗费的时间，其中包括以下几点。

(1) 安装和卸下工件所需要的时间。

(2) 操作机床所需的时间，如开动和停止机床，变换转速与进给量等。

(3) 工具转移位置所需的时间，如刀具的引进与退出。

(4) 测量工件所需的时间。

上述基本时间和辅助时间的总和称为工序作业时间，它是直接用于制造产品或零、部件所消耗的时间。

3. 工作地点服务时间 $T_服$

工作地点服务时间 $T_服$ 是指在工作班内照管工作地点及保持工作正常状态所耗费的时间。其中包括以下几点。

(1) 调整和更换刀具、修整砂轮。

(2) 润滑和擦拭机床、清理切屑。

(3) 上班前准备和下班时收拾工作等。

工作地服务时间 $T_{服}$ 一般按工序作业时间的 2%～7%计算。

4. 休息与生理需要休息时间 $T_{休}$

休息与生理需要休息时间 $T_{休}$ 是指用于生理需要和自然需要的休息时间。一般按工序作业时间的 2%计算。

5. 准备终结时间 $T_{准-终}$

工人为了生产一批产品或零、部件，在开始加工时，需要熟悉工艺文件，领取毛坯和工艺装备，安装刀具与夹具，调整机床和刀具等；加工完一批工件后，需拆下和归还工艺装备，归还图样工艺文件，送交成品等。为了生产一批产品或零、部件，进行准备和结束工作所消耗的时间称为准备与终结时间。准备与终结时间消耗在一批工件上，若一批工件的数量为 N,则分摊到每个工件上的时间为 $T_{准-终}/N$。可以看出，当 N 很大时(大批大量生产)，$T_{准-终}/N$ 就可以忽略不计。

综上所述，单件时间 $T_{单件}$ 为：

$$T_{单件}=T_{基}+T_{辅}+T_{服}+T_{休} \tag{1-9}$$

对于成批生产，单件计算时间 $T_{单计}$：

$$T_{单计}=T_{单件}+T_{准-终}/N=T_{基}+T_{辅}+T_{服}+T_{休}+T_{准-终}/N \tag{1-10}$$

对于大量生产，单件计算时间 $T_{单计}$：

$$T_{单计}=T_{单件} \tag{1-11}$$

1.7.2 时间定额的制定方法

制订时间定额应根据本企业的生产技术条件，使大多数工人经过努力都能达到，部分先进工人可以超过，少数工人经过努力可以达到或接近的平均先进水平。合理的时间定额能调动工人的积极性，促进工人不断提高技术水平，对于保证产品质量，提高劳动生产率和降低生产成本都有很重要的作用，必须认真地科学地加以制定。

制定时间定额的方法有以下几种。

(1) 由工时定额员、工艺人员和工人相结合，在总结过去经验的基础上查表后估算确定。

(2) 以同类产品的时间定额为依据，进行对比分析后推算确定。

(3) 通过对实际操作时间的测定和分析确定。

随着企业生产技术条件的改善和技术的发展，时间定额应定期进行修订，以不断保持定额的先进水平，进一步促进生产的发展。

1.8 工艺过程的技术经济性分析

制订机械加工工艺规程时，在同样能满足被加工零件的加工精度和表面质量的要求下，通常可以有几种不同的加工方案来实现。不同的方案有不同的经济效果，其生产率和成本

会有所不同。为了选取在给定的生产条件下的最佳方案，需进行技术经济性分析。

工艺过程的技术经济性分析有两种方法：一是对不同的工艺过程进行工艺成本的分析和评比，二是按相对技术经济指标进行宏观比较。

制造一个零件或一台产品所必需的一切费用的总和，就是零件或产品的生产成本。这种制造费用实际上可分为与工艺过程有关的费用和与工艺过程无关的费用两类。其中，与工艺过程有关的费用约占 70%～75%。因此，对不同的工艺方案进行经济分析和评比时，就只需分析、评比它们与工艺过程直接有关的生产费用，即所谓工艺成本。

与工艺过程无关的那部分成本，如行政总务人员的工资、厂房折旧和维修费、照明取暖费等，在不同方案的分析和评比中均是相等的，因而可以略去。

工艺成本按照与年产量的关系，分为可变费用 V 和不变费用 C 两部分。

1. 可变费用 V

它是与年产量直接有关，即随年产量的增减而成比例变动的费用。它包括材料或毛坯费、操作工人的工资、机床电费、通用机床的折旧费和维修费以及通用工装(夹具、刀具和辅具等)的折旧费和维修费等。可变费用的单位是元/件。

2. 不变费用 C

它是与年产量无直接关系，不随年产量的增减而变化的费用。它包括调整工人的工资、专用机床的折旧费和维修费以及专用工装的折旧费和维修费等。不变费用的单位是元/年。专用机床和专用工装(夹具)专为某工件的某加工工序所用，它不能被其他工序所用，当产量不足、负荷不满时就只能闲置不用；而专用机床和专用工装(夹具)的折旧年限是确定的。因此，专用机床和专用工装(夹具)的费用不随年产量的增减而变化。

判别可变费用和不变费用的另一方法是费用的单位，前者的单位是元/件，后者的单位是元/年。

因此，一种零件(或一道工序)的全年工艺成本 S 可用式(1-12)表示：

$$S = N \cdot V + C \tag{1-12}$$

式中　V——每个零件的可变费用，元/件；

N——零件的生产纲领，件；

C——全年的不变费用，元/年。

因此，单件工艺(或工序)成本 S_i 就是：

$$S_i = V + \frac{C}{N} \tag{1-13}$$

可见，全年工艺成本 S 与零件生产纲领 N 成线性正比关系(如图 1.37 所示)，直线的斜率为工件的可变费用，直线的起点(截距)为工件的不变费用。而单件工艺成本 S_i 则与 N 成双曲线关系(如图 1.38 所示)，即：当 N 很小时，由于设备负荷很低，单件工艺成本 S_i 就会很高，如在 $N < N_1$ 的情况下，则当 N 据有变化 ΔN_1 时，S_i 就会有很大的变化 ΔS_{i1}；而当 N 很大时，如在 $N > N_2$ 的情况下，则结果相反，因 S_i 已相应很低，所以此时即使有较大变化 ΔN_2，对 S_i 的影响已很不敏感(ΔS_{i2} 就很小)。这种双曲线变化关系表明：当 C 值(主要是专用设备费)一定时，若年生产纲领较小，则 C/N 与 V 相比在成本中所占比重就较大，因此 N

的增大就会使成本显著下降，这种情况就相当于单件生产与小批生产；反之，当年生产纲领超过一定范围，使 C/N 所占比重已很小，此时就需要采用生产率更高的方案，使 V 减小，才能获得好的经济效果，这就相当于大量、大批生产的情况。

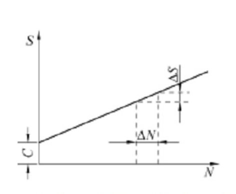


图 1.37　全年工艺成本与零件年产纲领的关系

图 1.38　单件工艺成本与零件年产纲领的关系

当两个方案有较多的工序不同时，就可按式(1-12)对这两种工艺方案的全年工艺成本进行分析和比较：

$$S_\mathrm{I}=N\cdot V_\mathrm{I}+C$$
$$S_\mathrm{II}=N\cdot V_\mathrm{II}+C$$

当年生产纲领变化时，由图 1.40 可知，可按两曲线交点的临界产量 N_c 分别选定经济方案Ⅰ或Ⅱ。此时的 N_c 为：

由
$$N_c\cdot V_\mathrm{I}+C_\mathrm{I}=N_c\cdot V_\mathrm{II}+C_\mathrm{II}$$

得：
$$N_c=\frac{C_\mathrm{II}-C_\mathrm{I}}{V_\mathrm{I}-V_\mathrm{II}} \tag{1-14}$$

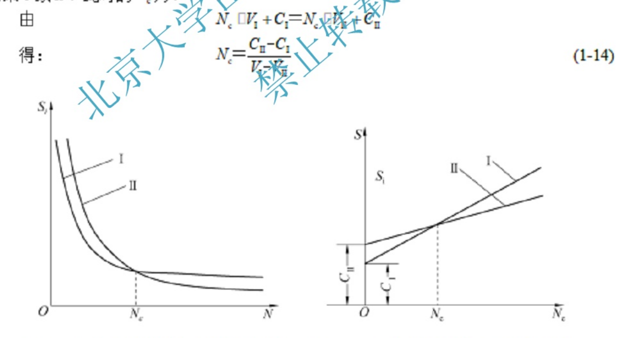


图 1.39　两种工艺方案单件工艺成本的比较　　图 1.40　两种工艺方案全年工艺成本的比较

当两个工艺方案的基本投资差额较大时，通常就是由于工艺方案中采用了高生产率的价格昂贵的设备或工艺装备，即用较大的基本投资而提高劳动生产率使单件工艺成本降低。因此，在做评比时就必须同时考虑到这种投资的回收期限，回收期越短则经济效果就越好。

一般情况下，回收期应满足以下要求。

(1) 回收期应小于所用设备的使用年限。

(2) 回收期应小于市场对该产品的需求年限。

(3) 回收期应小于国家规定的标准回收期，例如夹具为 2～3 年，机床为 4～6 年。

进行技术经济分析时，必须注意：要在确保零件制造质量的前提下，全面考虑提高劳动生产率，改善劳动条件和促进生产技术的发展等问题。通常对生产纲领较大的主要零件的工艺方案，应通过对工艺成本的估算和对比评价其经济性来确定；而对于一般零件，则可利用各种技术经济指标(常用的有：每台机床的年产量——吨/台、件/台，每一生产工人的年产量——吨/人、件/人，每平方米生产面积的年产量——7 吨/米^2、件/米^2，材料利用率，设备负荷率等)，结合生产经验，对不同方案进行经济论证，选取在该生产条件下最经济合理的方案。

本章小结

本章对制定机械加工工艺规程的基本概念、基本原理作了较详细的阐述，包括制定机加工艺过程中的基本概念、制定机械加工工艺规程的原始资料及步骤、制定机械加工工艺规程的基本原理和方法、工艺过程的技术经济性分析。

制定机加工艺过程中的基本概念包括工序、安装、工步、工位、走刀、生产类型、生产纲领、时间定额的组成和各部分的含义。

制定机械加工工艺规程的基本原理包括制定机械加工工艺规程的原始资料及步骤、零件结构工艺性的分析、毛坯的选择、粗、精基准选择的原则、表面加工方法和加工方案的选择、加工阶段的划分、加工顺序的确定、机床、工艺装备等的选择、工序集中和分散的安排、影响加工余量大小的因素及确定加工余量的方法、时间定额的制定。

工艺过程的技术经济性分析包括工艺成本、生产成本的含义，不同工艺方案的技术经济评价方法。

本章的教学目标是使学生掌握制定机械加工工艺规程的基础知识，能分析和制订简单零件的工艺过程，会填写工艺文件。

习 题

(1) 什么是生产过程和工艺规程？

(2) 什么是工序、安装、工步、走刀和工位？

(3) 生产类型是根据什么划分的？常用的有哪几种生产类型？

(4) 什么叫基准？工艺基准包括哪几种基准？

(5) 毛坯选择时，应考虑哪些因素？

(6) 基准分为哪两类？粗、精基准选择原则有哪些？

(7) 表面加工方法选择时应考虑哪些因素？

(8) 工件加工质量要求较高时，应划分哪几个加工阶段？各加工阶段的主要任务是什么？划分加工阶段的原因是什么？

(9) 机械加工工序应如何安排？

(10) 什么是加工工序余量和加工总余量？ 加工余量的确定有哪几种方法？影响工序间加工余量的因素有哪些？

(11) 何谓时间定额？批量生产时，时间定额由哪些部分组成？

(12) 安排热处理工序的目的是什么？有哪些热处理工序？

(13) 工艺文件有哪些？

(14) 何谓工序集中？何谓工序分散？工序集中与工序分散各有何特点？决定工序集中与分散的主要因素是什么？为什么说目前和将来大多倾向于采用工序集中的原则来组织生产？

(15) 有色金属零件为什么不宜选用磨削加工的方法？是否绝对不能采用？

(16) 零件在进行机械加工前为什么要定位？

(17) 如图 1.41 所示零件，毛坯为模锻件，其机械加工工艺过程如下。

在第一台车床上先车端面，然后粗镗孔、半精镗孔并倒角。在另一台车床上粗车外圆及另一端面，半精车外圆并倒角，内孔倒角，掉头，外圆倒角；插键槽；滚齿；热处理；磨孔；磨齿。试分析其工艺过程的组成。

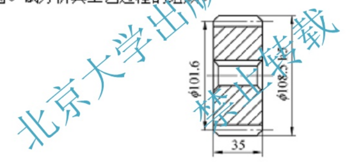


图 1.41　齿轮零件

(18) 某机床厂年产 CW6140 普通车床 500 台，已知机床主轴的备品率为 20%，废品率为 4%，试计算主轴的生产纲领。此主轴属于何种生产类型？工艺过程应有何特点？

(19) 在大批大量生产条件下，加工一批直径为 $\phi25^{0}_{-0.03}$ mm，长度 58mm 的光轴，其表面粗糙度 $Ra<0.16\mu m$，该零件材料为 45 钢。请确定其加工方法。

(20) 什么叫生产成本？什么叫工艺成本？

综 合 实 训

(1) 编写图 1.42 所示的盘状零件在单件小批生产和中批生产时的工艺过程。

(2) 图 1.43 所示各零件加工时的粗、精基准应如何选择(标有△符号的为加工面，其余为非加工面)？并简要地说明理由。注：图 1.43(a)中要求外毂壁厚较均匀，图 1.43(b)中要求壳壁较均匀。

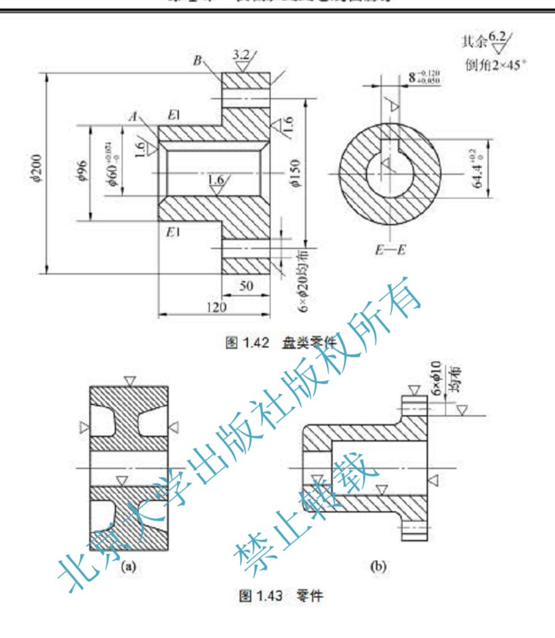


图 1.42　盘类零件

图 1.43　零件

表 1-8 机械加

(工厂名)	机械加工工序卡片	产品名称及型号	零件名称
			车间
			同时加工件数
			设备名称
			更改内容

工步号	工步内容	计算数据			走刀次数	切削用	
		直径或长度	走刀长度	单边余量		背吃刀量/mm	进给量/(mm/s或mm/min)

编制		抄写		校对	

加工工序卡片

零件图号	工序名称	工序号	第　　页
			共　　页
工段	材料名称	材料牌号	机械性能
每料件数	技术等级	单件时间/min	准备一终结时间/min
设备编号	夹具名称	夹具编号	冷却液

量		工时定额/min			刀具量及辅助工具				
每分钟转数或双行程数	切削速度/(m/min)	基本时间	辅助时间	工作地点服务时间	工步号	名称	规格	编号	数量

	审核		批准	

第 2 章　机械加工精度

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
了解机械加工精度的概念及加工误差的来源	机械加工精度，机械加工误差	10%	
掌握原理误差的概念及其对加工精度的影响	原理误差	10%	
掌握工艺系统的几何误差及其对加工精度的影响	机床误差，夹具的制造误差与磨损，刀具的制造误差与磨损，调整误差	20%	
掌握工艺系统的受力变形及其对加工精度的影响	工艺系统刚度的计算，工艺系统刚度对加工精度的影响，机床部件刚度，减小工艺系统受力变形对加工精度影响的措施，残余应力引起的变形	20%	
掌握工艺系统的受热变形及其对加工精度的影响	工艺系统的热源，工件热变形、刀具热变形、机床热变形对加工精度的影响、减少工艺系统热变形对加工精度影响的措施	15%	
掌握加工误差的统计分析方法	分布图分析法、点图分析法	25%	
了解保证和提高加工精度的途径	误差预防技术，误差补偿技术	10%	

引例

汽车曲轴(如右图所示)是内燃发动机的关键零件，其制造质量直接影响发动机性能。由于曲轴形状复杂、精度高、刚性差，加工十分困难。在汽车曲轴的关键加工工序中所要使用的磨削加工设备结构复杂，对加工精度、加工精度的稳定性、工作的可靠性要求非常高，是研发、设计和制造难度都很大的高技术集成化专用装备。



汽车曲轴

由于多方面的因素，我国曲轴磨床长期处于较落后的状况，不能满足高要求曲轴的加工需要，对于高要求的曲轴多数依靠进口设备加工。近年来，我国以华中科技大学等为代表的一些科研单位在这方面做了大量的工作，取得了一系列成果，开发出了一些具有自主知识产权的曲轴磨床设备。

2.1　概　　述

产品质量是企业的生命线。按现代质量观，它包括设计质量、制造质量和服务质量三大组成部分。对于机械行业来说，各种产品均是由若干个零件组成的。因此，零件的加工质量是保证机械产品质量的基础。零件的加工质量包括零件的机械加工精度和加工表面质量两大方面。本章的任务是讨论零件的机械加工精度问题，它是机械制造工艺学的主要研究问题之一。

2.1.1　机械加工精度

1. 机械加工精度的概念

任何一个零件都是通过不同的机械加工方法获得的。实际加工所获得的零件在尺寸、形状或位置方面都不可能和理想零件绝对准确一致，它们之间总有一些差异。为此，在零件图上对其尺寸、形状和有关表面间的位置都必须以一定形式标注出能满足该零件使用性能的允许误差或偏差，即公差。习惯上是以公差值的大小或公差等级表示对零件的机械加工精度要求。公差值或公差等级越小，表示对该零件的机械加工精度要求越高。

特别提示

在机械加工中，所获得的每个零件的实际尺寸、形状和有关表面之间的位置，都必须在零件图上所规定的有关公差范围之内。可靠地保证零件图样所要求的精度是机械加工最基本的任务之一。

机械加工精度是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和表面间的相互位置)与理想几何参数的符合程度。符合程度越高，加工精度越高。

零件的加工精度包括：尺寸精度、形状精度和位置精度。尺寸精度用来限制加工表面与其基准间的尺寸误差在一定的范围之内；形状精度用来限制加工表面宏观几何形状误差，如圆度、圆柱度、直线度等；位置精度用来限制加工表面与其基准间的相互位置误差，如平行度、同轴度等。这三者之间是有联系的，通常尺寸精度要求高，形状精度和位置精度的要求也越高。

特别提示

加工精度越高越能满足使用性能的要求，但加工精度越高，所对应的生产成本也会越高，生产效率就会越低。因此，对于加工精度的要求，应该以满足使用性能为基本要求，在此基础上，再尽可能的降低成本，提高生产率。

2. 获得加工精度的方法

在机械加工中，根据生产批量和生产条件的不同有很多获得加工精度的方法。

1) 获得尺寸精度的方法

(1) 试切法。试切法是指在零件加工过程中不断对已加工表面的尺寸进行测量，并相应调整刀具相对工件加工表面的位置进行试切，直到满足尺寸精度要求的加工方法。该方法是获得零件尺寸精度最早采用的加工方法，同时也是目前常用的获得高精度尺寸的主要

方法之一，主要用于单件小批生产。

(2) 调整法。调整法是指按试切好的工件尺寸、标准件或对刀块等调整确定刀具相对工件定位基准的准确位置，并在保持此准确位置不变的条件下，对一批工件进行加工的方法，多用于大批大量生产，在摇臂钻床上用钻床夹具加工孔系即为此法。

(3) 定尺寸刀具法。在加工中采用具有一定尺寸的刀具或组合刀具，以保证被加工零件尺寸精度。该方法生产率高，但刀具制造复杂，成本高。用方形拉刀拉方孔，用镗刀块加工内孔等即属此法。

(4) 自动控制法。在加工过程中，通过由尺寸测量装置、动力进给装置和控制机构等组成的自动控制系统，使加工过程中的尺寸测量、刀具的补偿调整和切削加工等一系列工作自动完成，从而自动获得所要求尺寸精度。数控机床上的大多数操作属于此法。

2) 获得形状精度的方法

(1) 成形运动法。零件的各种表面可以归纳为几种简单几何形面，比如平面、圆柱面等，这些几何形面均可通过刀具和工件之间作一定的运动加工出来。成形运动是保证得到工件要求的表面形状的运动，成形运动法就是利用刀具和工件之间的成形运动来加工表面的方法。

成形运动法根据具体所使用刀具的不同，又可分为轨迹法(利用刀尖运动轨迹形成工件表面形状)、成形法(由成形刀具刀刃的形状形成工件表面形状)、展成法(由切削刃包络面形成工件表面形状)和相切法(利用盘状刀具边旋转边作一定规律的轨迹运动获得工件表面形状)。

(2) 非成形运动法。该类方法中，零件表面形状精度的获得不是靠刀具相对工件的准确成形运动，而是靠在加工过程中对加工表面形状的不断检验和工人对其进行精细修整加工的方法。该类方法是获得零件表面形状尺寸精度最原始的方法，但到目前为止，在一些复杂型面和形状精度要求很高的表面加工过程中仍然采用。

3) 获得位置精度的方法

在机械加工中，位置精度主要由机床精度、夹具精度和工件的装夹精度来保证，获得位置精度的方法主要有下列两种。

(1) 一次装夹获得法。该方法中，零件有关表面的位置精度是直接在工件的同一次装夹中，由各有关刀具相对工件的成形运动之间的位置关系保证的。如轴类零件外圆与端面的垂直度，箱体孔系加工中各孔之间的同轴度、平行度等，均可用此法获得。

(2) 多次装夹获得法。该方法中，零件有关表面间的位置精度是由刀具相对工件的成形运动与工件定位基准面之间的位置关系保证的。如轴类零件上键槽对外圆表面的对称度、箱体平面与平面之间的平行度等，均可用此法获得。在多次装夹获得法中，又可根据工件的不同装夹方式划分为直接装夹法、找正装夹法和夹具装夹法。

2.1.2 机械加工误差

1. 机械加工误差的概念

机械加工误差是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和表面间的相互位置)与理想几何参数偏离程度。在机械加工过程中，由于各种因素的影响，加工出的零件不可能与理想的要求完全符合，即使在同样的生产条件下，也不可能加工出完全相同的零件来。在

不影响使用性能的前提下，应该允许生产出的零件相对理想参数存在一定程度的偏离。零件在尺寸、形状和表面间相互位置方面与理想零件之间的差值分别称为尺寸、形状和位置误差。

特别提示

加工精度和加工误差是从两个不同的角度来评定加工零件的几何参数的。常用加工误差的大小来评价加工精度的高低。加工误差越小，加工精度越高。所谓保证和提高加工精度问题，实际上就是控制和降低加工误差。

2. 机械加工误差的来源

1) 原始误差

在机械加工中，零件的尺寸、几何形状和表面间相对位置的形成，取决于工件和刀具在切削运动过程中相互位置的关系，而工件和刀具又安装在夹具和机床上，并受到夹具和机床的约束。因此，机床、夹具、刀具和工件就构成了一个完整的系统，把这个系统称作工艺系统。

工艺系统的各种误差，会在不同的具体条件下，以不同的程度和方式反映为加工误差。可以说，工艺系统的各种误差是引起零件加工误差的根源。因此，把工艺系统的误差称作原始误差。

实例分析 2-1

下面以活塞加工中精镗销孔工序的加工过程为例，分析影响工件和刀具间相互位置的各种因素，以建立对工艺系统中各类原始误差的感性认识。

1) 装夹

活塞以止口及其端面为定位基准，在夹具中定位，并用菱形销插入经半精镗的销孔中作周向定位。固定活塞的夹紧力作用在活塞的顶部(图 2.1)。这时就产生了由于设计基准(顶面)与定位基准(止口端面)不重合，以及定位止口与夹具上凸台、菱形销与销孔的配合间隙而引起的定位误差，还存在由于夹紧力过大而引起的夹紧误差。这两项原始误差统称为工件装夹误差。

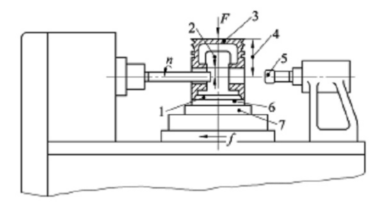


图 2.1　活塞销孔精镗工序示意

1—定位止口　2—对刀尺寸　3—设计基准　4—设计尺寸
5—定位用菱形销　6—定位基准　7—夹具

2) 调整

装夹工件前后，必须对机床、刀具和夹具进行调整，并在试切几个工件后再进行精确微调，才能使工件和刀具之间保持正确的相对位置。例如，本例需要进行夹具在工作台上的位置调整，菱形销与主轴同轴度的调整，以及对刀调整(调整镗刀切削刃的伸出长度以保证镗孔直径)等。由于调整不可能绝对精确，因而就会产生调整误差。另外，机床、刀具、夹具本身的制造误差在加工前就已经存在了。这类原始误差称为工艺系统的几何误差。

3) 加工

由于在加工过程中产生了切削力、切削热和摩擦，它们将引起工艺系统的受力变形、受热变形和磨损，这些都会影响在调整时所获得的工件与刀具之间的相对位置，造成各种加工误差。这类在加工过程中产生的原始误差称为工艺系统的动误差。

在加工过程中，还必须对工件进行测量，才能确定加工是否合格，工艺系统是否需要重新调整。任何测量方法和量具、量仪也不可能绝对准确，因此测量误差也是一项不容忽视的原始误差。

测量误差是工件的测量尺寸与实际尺寸之间的差值。加工一般精度的零件时，测量误差可占到工序尺寸公差的 1/5～1/10；加工精密零件时，测量误差可占到工序尺寸公差的 1/3 左右。

此外，工件在毛坯制造、切削加工和热处理时的力和热的作用下产生的内应力，将会引起工件变形而产生加工误差。有时由于采用了近似的成形方法进行加工，还会造成加工原理误差。因此，工件内应力引起的变形及原理误差也是原始误差。

2) 原始误差的分类

结合实例分析 2-1，可知原始误差可以进行如图 2.2 所示的分类。

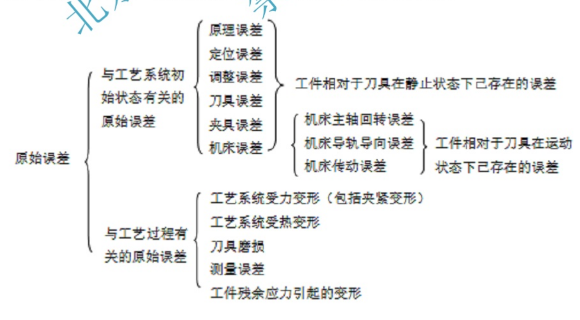


图 2.2　原始误差的分类

3. 机械加工误差的性质

区分机械加工误差的性质是研究和解决加工精度问题极为重要的环节。各种机械加工误差可以按它们在加工一批工件时出现的规律分为系统误差和随机误差两类。

(1) 系统误差。在相同的工艺条件下，加工一批零件时产生的大小和方向不变或按加工顺序作规律性变化的误差，称作系统误差。前者称为常值系统误差，后者称为变值系统误差。

机床、夹具、刀具和量具本身的制造误差，机床、夹具和量具的磨损，加工过程中刀具的调整以及它们在恒定力作用下的变形等造成的加工误差，一般都是常值系统误差。机床、夹具和刀具等在热平衡前的热变形，加工过程中刀具的磨损等都是随着时间的延长而作规律性变化的，它们所造成的加工误差，一般可认为是变值系统误差。

(2) 随机误差。在相同的工艺条件下，加工一批零件时产生的大小和方向不同且无变化规律的加工误差，称作随机误差。

零件加工前的毛坯或工件的本身误差(如加工余量不均匀或材质软硬不等)，工件的定位误差，机床热平衡后的温度波动以及工件残余应力变形等所引起的加工误差均属于随机误差。

随机误差没有明显的变化规律，并且引起的原因也千差万别，很难完全消除，但可以应用数理统计的方法找出随机误差的规律，然后在工艺上采取措施加以控制，对其产生的根源采取适当的措施，减少它的影响。比如，毛坯带来的误差，可从缩小毛坯本身的误差和提高工艺系统刚度来减少其影响。

特别提示

应该指出的是，同一原始误差有时会引起系统误差，有时则产生随机误差。例如，在一批零件的加工中，机床一次调整产生系统误差，但如经过多次调整才加工成这批零件，则调整误差就无明显的规律，而成为随机误差。

4. 误差的敏感方向

工艺系统中存在多种原始误差，通常，各种原始误差的大小和方向是各不相同的。不同的原始误差对加工精度有着不同的影响。当原始误差的方向与工序尺寸方向一致时，其对加工精度的影响就最大。

实例分析 2-2

如图 2.3 所示，车削轴类零件的外圆。车削时工件的回转轴心是 O 点，刀尖正确位置在 A 点，设某一瞬间由于各种原始误差的影响，刀尖位移到 A' 点。$\overline{AA'}$ 即为原始误差 δ，它与 $\overline{OA}$ 间夹角为 ϕ，由此引起工件加工后的半径由 $R_0=\overline{OA}$ 变为 $R=\overline{OA'}$，所以半径上(即工序尺寸方向上)的加工误差为：

$$\Delta R=\overline{OA'}-\overline{OA}=\sqrt{R_0^2+\delta^2+2R_0\delta\cos\phi}-R_0\approx\delta\cos\phi+\frac{\delta^2}{2R_0}$$

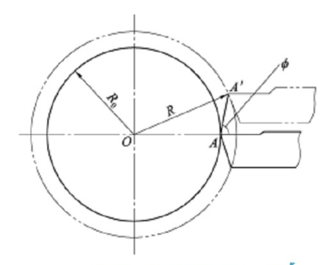


图 2.3　误差的敏感方向

可以看出：当原始误差的方向为加工表面的法向方向时($\phi=0$)，引起的加工误差 $\Delta R_{\phi=0}=\delta$ 为最大$\left(忽略\dfrac{\delta^2}{2R_0}项\right)$；当原始误差方向为加工表面的切线方向时($\phi=90°$)，引起的加工误差 $\Delta R_{\phi=90°}=\dfrac{\delta^2}{2R_0}$ 为最小，通常可以忽略。

为了便于分析原始误差对加工精度的影响，把对加工精度影响最大的那个方向(即通过刀刃的加工表面的法向)称为误差的敏感方向。

2.1.3　研究加工精度的目的与方法

1. 研究加工精度的目的

研究加工精度的目的，就是要弄清各种原始误差的物理、力学本质以及它们对加工精度影响的规律，掌握控制加工误差的方法，以期获得预期的加工精度，需要时能找出进一步提高加工精度的途径。

2. 研究加工精度的方法

研究加工精度的方法有以下两种。

1) 单因素分析法

该方法研究某一确定因素对加工精度的影响，为简单起见，研究时一般不考虑其他因素的同时作用。通过分析计算，测试或实验，得出该因素与加工误差间的关系。

2) 统计分析法

该方法以生产中一批工件的实测结果为基础，运用数理统计方法进行数据处理，用以控制工艺过程的正常进行。当发生质量问题时，可以从中判断误差的性质，找出误差出现的规律，以指导解决有关的加工精度问题。统计分析法只适用于批量生产。

在实际生产中，这两种方法常常结合起来应用。一般先用统计分析法寻找误差的出现规律，初步判断产生加工误差的可能原因，然后运用单因素分析法进行分析、试验以便迅速有效地找出影响加工精度的主要原因。



全面质量管理

1．全面质量管理的概念

ISO 8402—1994《质量管理和质量保证术语》对全面质量管理(TQM)的定义是："一个组织以质量为中心，以全员参与为基础，目的在于通过让顾客满意和本组织所有成员受益而达到长期成功的管理途径。"

全面质量管理并不等同于传统意义上的质量管理，传统意义上的质量管理只是作为组织所有管理职能之一，与其他管理职能(如财务管理、物质管理、生产管理、劳动人事管理、后勤保障管理等)并存。而全面质量管理是质量管理更深层次、更高境界的管理，它将如上所述的组织的所有管理职能均纳入质量管理的范围(当然并不适宜全面质量管理取代企业的所有管理)。全面质量管理特别强调了一个组织必须以质量为中心，否则就不是全面质量管理。

全面质量管理源于美国，在日本得到重视和发展，并取得极其明显的效果，最后又由日本推向全世界。

全面质量管理与其说是质量管理方法的进步，不如说是质量管理理论与思想的突破性变革。以前的质量管理着重于生产现场的控制与产品成品检验，其理论依据是认为产品质量是生产出来的，即产品质量决定于生产过程的好坏。全面质量管理则认为，产品质量不仅仅由生产过程决定，它实际上是企业各项管理工作、设计工作、生产经营活动所共同决定的，是企业全部经济活动的综合反映。也就是说，企业里任何一项经济活动都有可能影响着，甚至决定着产品质量。

2．全面质量管理的基本观点

1)"质量第一"的观点

产品质量的好坏，关系到企业的生存和发展。在实际生产经营活动中，质量和数量的矛盾是经常发生的，应该以质量第一作为解决矛盾的基本思想，认真贯彻"质量第一"的方针。

2) 一切为用户服务的观点

这是进行全面质量管理的基本出发点。产品是为用户服务的，用户的要求就是产品质量的目标，也是检验质量好坏的客观标准。全面质量管理把这一思想推而广之：每一后续工作都是前道工作的用户，后续工作的要求就是前道工作质量好坏的目标。因此，企业里每个人员都应该明确自己的下道工序，也就是明确自己的用户，然后再考虑如何为它服务。这样 "质量第一"、"为用户服务"就都有了具体落实的内容。

3)"质量形成于生产全过程"的观点

产品质量是经过市场调查、设计、试制把质量规定下来，再经过制造、装配把规定的质量兑现出来的。因此，产品质量需要通过设计去体现，但更需要通过原材料、设备、工艺和加工去实现，还需要通过各种服务去保证它的表现，即产品质量与它的生命周期的全部阶段有关。但这绝不是否认或者轻视有关产品质量的检查、试验工作的必要性和重要性。

没有检查、试验，就无法判断设计所体现的产品质量是否被制造实现了；就无法判断制造所实现了的产品质量是否由服务保证了它的表现。“产品质量形成于生产全过程”的观点，强调了产品质量归根结底是由前后方的生产工人用他们的劳动所实现的。

4) 质量好坏要凭数据说话的观点

质量好坏的重要依据是数据。在进行质量分析时，需要有准确的数据，有了准确的数据，才能把握现状，分析问题，改进管理，调整生产过程中的问题，把质量控制在一定范围之内。

5) 预防为主，防检结合的观点

全面质量管理要求把质量管理工作的重点从事后“把关”转移到事前“预防”为主，从对产品结果进行管理变为对质量形成因素进行控制，这样一方面可以把废次品杜绝在出现之前，减少了因废次品出现而造成的经济损失；更重要的是使生产过程形成一个稳定的生产优质产品的系统。

6) 全面质量管理是一种以人为本的管理

全面质量管理强调在质量管理中要调动人的积极性，发挥人的创造性。产品质量不仅要使用户满意，而且要使本组织的每个职工满意。以人为本，就是要使企业全体员工，特别是生产第一线的职工齐心协力搞好质量。

7) 全面质量管理是一种突出质量改进的动态性管理

传统质量管理思想的核心是“质量控制”，是一种静态的管理。全面质量管理强调有组织、有计划、持续地进行质量改进，不断地满足变化着的市场和用户的需求，是一种动态性的管理。

2.2 原理误差

在机械加工中的许多场合下，为了得到要求的工件表面，必须采用具有一定形状的切削刃，在工件和刀具的运动之间建立一定的联系。把这种得到所要求的表面所需要的联系称为加工原理。例如，车削螺纹时，必须使工件和车刀之间有准确的螺旋运动联系；滚切齿轮时，必须使齿坯和滚刀之间有准确的展成运动。这种运动联系一般是由机床的机构来保证的，也有些场合是用夹具来保证的。从理论上讲，应当采用理想的加工原理，即完全准确的运动联系，以求获得完全准确的要求表面。但是，采用理论上完全正确的加工原理有时会使机床或夹具的结构极为复杂，致使制造困难，或者由于环节过多，增加了机构运动中的误差，反而得不到高的加工精度。所以，在实践中，常采用近似的成形运动或者近似的切削刃轮廓。把由于采用了近似的成形运动或者近似的切削刃轮廓进行加工而产生的误差称为加工原理误差，简称原理误差。

实例分析 2-3

在三坐标数控铣床上铣削复杂型面零件时，通常要用球头刀并采用“行切法”加工。所谓行切法，就是球头刀与零件轮廓的切点轨迹是一行一行的，而行间的距离 s 是按零件加工要求确定的。究其实质，这种方法是将空间立体型面视为众多的平面截线的集合，每

次走刀加工出其中的一条截线。每两次走刀之间的行间距 s 可以按下式确定(如图 2.4 所示)：$s=\sqrt{8Rh}$，式中，R 为球头刀半径，h 为允许的表面不平度。

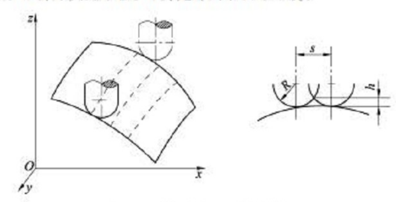


图 2.4　空间复杂曲面的数控加工

由于数控铣床一般只具有空间直线插补功能，所以即便是加工一条平面曲线，也必须用许多很短的折线段去逼近它。当刀具连续地将这些小线段加工出来，也就得到所需的曲线形状。逼近的精度可由每根线段的长度来控制。因此，就整个曲面而言，在三坐标联动的数控铣床上加工，实际上是以一段一段的空间直线逼近空间曲面，或者说，整个曲面就是由大量加工出的小直线段来逼近的(如图 2.5 所示)。这说明，在曲线或曲面的数控加工中，刀具相对于工件的成形运动是近似的。

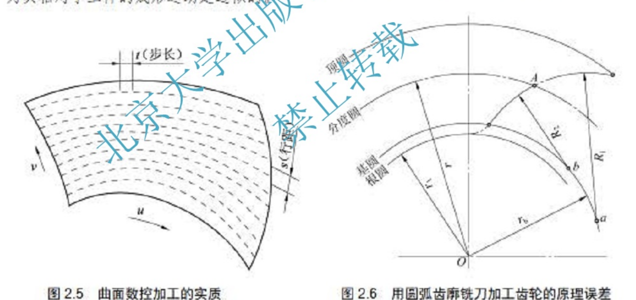


图 2.5　曲面数控加工的实质　　图 2.6　用圆弧齿廓铣刀加工齿轮的原理误差

实例分析 2-4

在用齿轮铣刀切制轮齿时，在被加工齿轮精度要求不高的情况下，齿轮铣刀的齿形可以用圆弧齿形来代替渐开线齿形，这样不仅使齿轮铣刀齿廓的计算简化，而且还能使磨削加工铣刀齿形时修整砂轮容易。当被加工齿轮的齿数 $z<55$ 时，铣刀齿廓可用圆心在基圆上的两段圆弧(半径为 R_1、R_2)来代替，当被加工齿轮的齿数 $z\geqslant 55$ 时，可用一个圆弧(半径为 R_1)来代替，如图 2.6 所示。用圆弧齿廓铣刀加工渐开线齿轮，就存在着原理误差。

实例分析 2-5

在用齿轮滚刀滚切齿轮时，也存在原理误差。具体包括两方面，一是为了制造方便，采用阿基米得蜗杆或法向直廓蜗杆代替渐开线基本蜗杆而产生的切削刃齿廓近似造形误差；二是由于滚刀刀齿有限，实际上加工出的齿形是一条由微小折线段组成的曲线，和理论上的光滑渐开线有差异。这些都会产生加工原理误差。

采用近似的成形运动或近似的切削刃轮廓，虽然会带来加工原理误差，但往往可简化机床结构或刀具形状，可提高生产效率，有时甚至能得到高的加工精度。因此，只要其误差不超过规定的精度要求(一般原理误差应小于 10%～15%工件的公差值)，在生产中仍可以得到广泛的应用。

2.3　工艺系统的几何误差对加工精度的影响及其控制

2.3.1　机床误差

引起机床误差的原因是机床的制造误差、安装误差和磨损。机床误差的项目很多，这里着重分析对工件加工精度影响较大的导轨导向误差、主轴回转误差和传动链的传动误差。

1. 机床主轴的回转误差

1) 主轴回转误差的基本概念

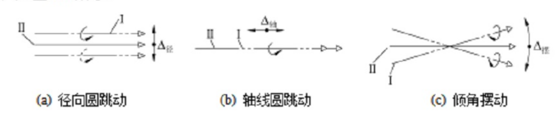
机床主轴是用来装夹工件或刀具并传递主要切削运动的重要零件。它的回转精度是机床精度的一项很重要指标，主要影响零件加工表面的几何形状精度、位置精度和表面粗糙度。

理想状态下主轴回转时，其回转轴线的空间位置应该固定不变，即回转轴线没有任何运动。实际上，由于主轴部件中轴承、轴颈、轴承座孔等的制造误差和配合质量、润滑条件以及回转时的动力因素的影响，主轴瞬时回转轴线的空间位置都在周期性地变化。

所谓主轴回转误差，是指主轴实际回转轴线对其理想回转轴线的漂移。

理想回转轴线虽然客观存在，但却无法确认其位置，因此通常是以平均回转轴线(即主轴各瞬时回转轴线的平均位置)来代替。

主轴回转轴线的运动误差可以分解为 3 种基本形式：径向圆跳动、轴向圆跳动和倾角摆动，如图 2.7 所示。



(a) 径向圆跳动　　(b) 轴线圆跳动　　(c) 倾角摆动

图 2.7　主轴回转误差的基本形式

I －主轴回转轴线　II －主轴平均回转轴线

(1) 径向圆跳动。它是主轴回转轴线相对于平均回转轴线在径向的变动量(如图 2.7(a)所示)。

(2) 轴向圆跳动。它是主轴回转轴线沿平均回转轴线方向的变动量(如图 2.7(b)所示)。

(3) 倾角摆动。主轴回转轴线相对平均回转轴线成一倾斜角度的运动(如图 2.7(c)所示)。

2) 主轴回转误差对加工精度的影响

对于不同的加工方法，不同形式的主轴回转误差所造成的加工误差通常是不相同的。

(1) 径向圆跳动。主轴的径向圆跳动会使工件产生圆度误差，但加工方法不同(如车削和镗削)，影响程度也不尽相同。车床上加工外圆内孔时，主轴径向跳动引起工件圆度和圆柱度误差，对工件端面无影响。一般精密车床的主轴径向跳动误差应控制在 5μm 以内。

(2) 轴向圆跳动。主轴的轴向圆跳动对圆柱面的加工精度没有影响，但在加工端面时，会使车出的端面与圆柱面不垂直；加工螺纹时，主轴的轴向圆跳动将使螺距产生周期误差。因此，对机床主轴的轴向圆跳动通常有严格的要求，如精密车床的主轴轴向圆跳动规定为 2～3μm，甚至更严。产生轴向圆跳动主要原因是主轴轴肩端面和轴承承载端面对主轴回转轴线有垂直度误差。

(3) 倾角摆动。当主轴轴线具有倾角度摆动时，可分为两种情况：一种是几何轴线相对于平均轴线在空间成一定锥角 α 的圆锥轨迹。若沿与平均轴线垂直的各个截面来看，相当于几何轴心绕平均轴心作偏心运动，只是各截面的偏心量有所不同而已。因此，无论是车削还是镗削，都能获得一个正圆锥。另一种是几何轴线在某一平面内作角摆动，若其频率与主轴回转频率相一致，沿与平均轴线垂直的各个截面来看，车削表面是一个圆，以整体而论车削出来的工件是一个圆柱，其半径等于刀尖到平均轴线的距离；镗削内孔时，在垂直于主轴平均轴线的各个截面内都形成椭圆，就工件内表面整体来说，镗削出来的是一个椭圆柱。

必须指出，实际上主轴工作时其回转轴线的漂移运动总是上述 3 种形式的误差运动的合成，故不同横截面内轴心的误差运动轨迹既不相同，又不相似，它既影响所加工工件圆柱面的形状精度，又影响端面的形状精度。

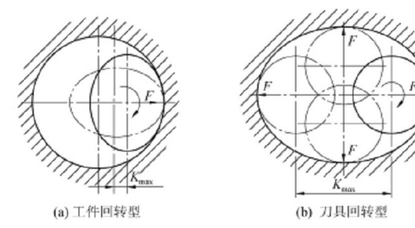
3) 影响主轴回转精度的主要因素

引起主轴回转轴线漂移的原因主要有：轴承的误差、轴承间隙、与轴承配合零件的误差及主轴系统的径向不等刚度和热变形，主轴转速对主轴回转误差也有影响。

(1) 轴承误差的影响。主轴采用滑动轴承时，轴承误差主要是指主轴颈和轴承内孔的圆度误差和波度。

对于工件回转类机床(如车床、磨床等)，切削力的方向大体上是不变的，主轴在切削力的作用下，主轴颈以不同部位和轴承内孔的某一固定部位相接触。因此，影响主轴回转精度的，主要是主轴轴颈的圆度和波度，而轴承孔的形状误差影响较小。如果主轴颈是椭圆形的，那么，主轴每回转一周，主轴回转轴线就径向圆跳动两次，如图 2.8(a)所示，其中 K_{max} 为最大跳动量。主轴轴颈表面如有波度，主轴回转时将产生高频的径向圆跳动。

对于刀具回转类机床(如镗床等)，由于切削力方向随主轴的回转而回转，主轴颈在切削力作用下总是以其某一固定部位与轴承内表面的不同部位接触。因此，对主轴回转精度影响较大的是轴承孔的圆度和波度。如果轴承孔是椭圆形的，则主轴每回转一周，就径向圆跳动一次，如图 2.8(b)所示。轴承内孔表面如有波度，同样会使主轴产生高频径向圆跳动。



(a) 工件回转型　　(b) 刀具回转型

图 2.8　采用滑动轴承时主轴的径向跳动

主轴采用滚动轴承时，由于滚动轴承是由内圈、外圈和滚动体等组成，影响的因素更多。

对于轴承内、外圈滚道的圆度误差和波度对回转精度的影响，分析时可视外圈滚道相当于轴承孔，内圈滚道相当于轴。因此，对工件回转类机床，滚动轴承内圈滚道圆度对主轴回转精度影响较大，主轴每回转一周，径向圆跳动两次；对刀具回转类机床，外圈滚道对主轴精度影响较大，主轴每回转一周，径向圆跳动一次。滚动轴承的内、外圈滚道如有波动，则不管是工件回转类机床还是刀具回转类机床，主轴回转时都将产生高频径向圆跳动。

滚动轴承滚动体的尺寸误差会引起主轴回转的径向圆跳动。当最大的滚动体通过承载区一次，就会使主轴回转轴线发生一次最大的径向圆跳动。回转轴线的跳动周期与保持架的转速有关。由于保持架的转速近似为主轴转速的 1/2，所以主轴每回转两周，主轴轴线就径向圆跳动一次。

推力轴承滚道端面误差会造成主轴的轴向圆跳动。滚锥、向心推力轴承的内外滚道的倾斜既会造成主轴的轴向圆跳动，又会引起径向圆跳动和倾角摆动。

特别提示

除轴承本身精度外，与配合件精度有很大关系如主轴轴颈、支承座孔等精度。提高主轴及支承座孔的加工精度，选用高精度轴承，提高主轴部件装配精度、预紧和平衡等，都可以提高主轴回转精度。

(2) 轴承间隙的影响。主轴轴承间隙对回转精度也有影响，如轴承间隙过大，会使主轴工作时油膜厚度增大，油膜承载能力降低，当工作条件(载荷、转速等)变化时，油楔厚度变化较大，主轴轴线漂移量增大。

(3) 与轴承配合的零件误差的影响。由于轴承内、外圈或轴瓦很薄，受力后容易变形，因此与之相配合的轴颈或箱体支承孔的圆度误差，会使轴承圈或轴瓦发生变形而产生圆度误差。与轴承圈端面配合的零件如轴肩、过渡套、轴承端盖、螺母等的有关端面，如果有平面度误差或与主轴回转轴线不垂直，会使轴承圈滚道倾斜，造成主轴回转轴线的径向、轴向漂移。箱体前后支承孔、主轴前后支承轴颈的同轴度会使轴承内外圈滚道相对倾斜，同样也会引起主轴回转轴线的漂移。总之，提高与轴承相配合零件的制造精度和装配质量，对提高主轴回转精度有很密切的关系。

(4) 主轴转速的影响。由于主轴部件质量不平衡，机床各种随机振动以及回转轴线的不稳定随主轴转速增加而增加，使主轴在某个转速范围内的回转精度较高，超过这个范围时，误差就较大。

(5) 主轴系统的径向刚度不等和热变形。主轴系统的刚度，在不同方向上往往不等，当主轴上所受外力方向随主轴回转而变化时，就会因变形不一致而使主轴轴线漂移。

机床工作时，主轴系统的温度将升高，使主轴轴向膨胀和径向位移。由于轴承径向热变形不相等，前后轴承的热变形也不相同，在装卸工件和进行测量时主轴必须停车而使温度发生变化，这些都会引起主轴回转轴线的位置变化和漂移而影响主轴回转精度。

4) 提高主轴回转精度的措施

(1) 提高主轴部件的制造精度。首先应提高轴承的回转精度，如选用高精度的滚动轴承，或采用高精度的多油楔动压轴承和静压轴承。其次是提高箱体支承孔、主轴轴颈和与轴承相配合零件的有关表面的加工精度。此外，还可在装配时先测出滚动轴承及主轴锥孔的径向圆跳动，然后调节径向圆跳动的方位，使误差相互补偿或抵消，以减少轴承误差对主轴回转精度的影响。

(2) 对滚动轴承进行预紧。对滚动轴承适当预紧可以消除间隙，甚至产生微量过盈，由于轴承内外圈和滚动体弹性变形的相互制约，既增加了轴承刚度，又对轴承内外圈滚道和滚动体的误差起均化作用，因而可提高主轴的回转精度。

(3) 使主轴的回转误差不反映到工件上。直接保证工件在加工过程中的回转精度而不依赖于主轴，是保证工件形状精度的最简单而又有效的方法。例如，在外圆磨床上磨削外圆柱面时，为避免工件头架主轴回转误差的影响，工件采用两个固定顶尖支承，主轴只起传动作用(图 2.9)，工件的回转精度完全取决于顶尖和中心孔的形状误差和同轴度误差，提高顶尖和中心孔的精度要比提高主轴部件的精度容易且经济得多。又如，在镗床上加工箱体类零件上的孔时，可采用前、后导向套的镗模(图 2.10)，刀杆与主轴浮动连接，所以刀杆的回转精度与机床主轴回转精度也无关，仅由刀杆和导套的配合质量决定。

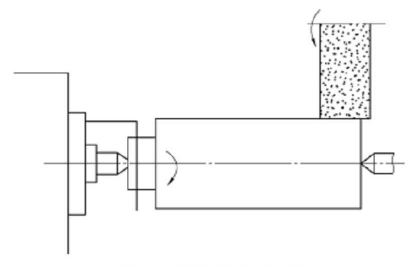


图 2.9　用固定顶尖支承磨外圆

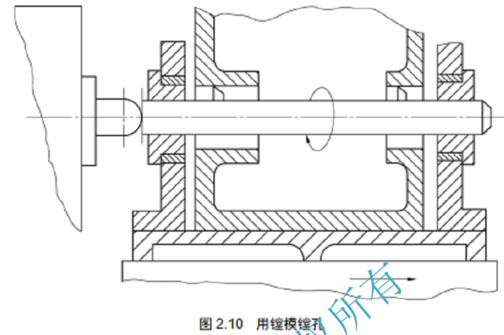


图 2.10　用镗模镗孔

2．机床传动链的传动误差

1) 传动链精度分析

(1) 传动误差的来源。机床中的传动链可以根据其性质分为外联系传动链和内联系传动链，其中内联系传动链联系的是两个执行件，并且这两个执行件之间必须有准确的运动关系。对于内联系传动链来说，各传动件的制造和装配误差，以及因受力和因温度变化而产生的变形都影响传动链的传动精度，并最终表现为对机械加工精度的影响。

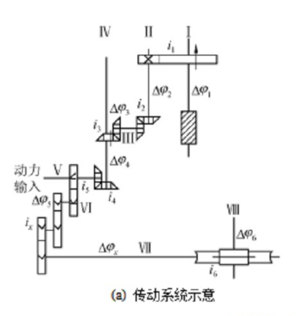
这里所讲的传动链的传动误差就是指内联系传动链中首末两端传动元件之间相对运动的误差。一般用传动链末端元件的转角误差来衡量。其产生的原因是传动链中各传动元件的制造误差、装配误差及磨损等。

(2) 传动链中误差的传递规律。此处以简化了的滚齿机展成链为例(如图 2.11 所示)，探讨传动链中误差的传递规律。

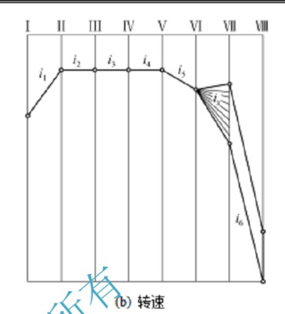
实例分析 2-6

图 2.11 是简化了的滚齿机展成链。图 2.11(a)是传动系统图，图 2.11(b)是它的转速图。运动自轴Ⅴ分两路传出。一路经传动副 i_4、i_3、i_2、i_1 传至滚刀主轴Ⅰ，另一路经 i_5、换置器官 i_x、i_6 传至工作台Ⅷ。直接影响展成链传动精度的是工件相对于滚刀的转角误差，即滚刀每一转，工件(工作台)的实际转角不是 $360°\frac{K}{z}$，而是 $360°\frac{K}{z}\pm\Delta\varphi_{\Sigma}°$($K$ 为滚刀头数，z 为工件齿数)。

从轴Ⅴ传往工作台的一路，设传动副 i_5 的各种误差使轴Ⅵ的转动产生转角误差 $\Delta\varphi_5$；i_x 的各种误差使轴Ⅶ的转动产生转角误差 $\Delta\varphi_x$。从轴Ⅴ传往滚刀主轴的一路，设传动副 i_4 使轴Ⅳ的转动产生转角误差 $\Delta\varphi_4$，等等，依次类推，这些误差都经过最后的一些传动副传到主轴和工作台。



(a) 传动系统示意



(b) 转速

图 2.11　滚齿机展成链

由于各个传动副的误差使主轴产生的转角误差分别对应为：

i_4 —— $\Delta\varphi_4 i_3 i_2 i_1$；$i_3$ —— $\Delta\varphi_3 i_2 i_1$；i_2 —— $\Delta\varphi_2 i_1$；i_1 —— $\Delta\varphi_1$

由于各个传动副的误差使工作台产生的转角误差分别为：

i_5 —— $\Delta\varphi_5 i_x i_6$；i_x —— $\Delta\varphi_x i_6$；i_6 —— $\Delta\varphi_6$

转角误差都是向量，总转角误差应为各分量的向量和。在向量方向未知的情况下，可取均方根值。滚刀主轴的总转角误差：

$$\Delta\varphi_{刀} = \sqrt{(\Delta\varphi_4 i_3 i_2 i_1)^2 + (\Delta\varphi_3 i_2 i_1)^2 + (\Delta\varphi_2 i_1)^2 + \Delta\varphi_1^2}$$

工作台总转角误差：

$$\Delta\varphi_{台} = \sqrt{(\Delta\varphi_5 i_x i_6)^2 + (\Delta\varphi_x i_6)^2 + \Delta\varphi_6^2}$$

主轴与工作台之间的相对转角误差：

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta\varphi_{刀}\frac{K}{z})^2 + \Delta\varphi_{台}^2}$$

特别提示

若传动副 i 在某一时刻产生转角误差为 $\Delta\varphi_i$，则它所造成传动链末端元件的转角误差为 $K_i\Delta\varphi_i$，其中，K_i 为该轴到末端元件的总传动比，称为误差传递系数，若 K_i 大于 1 则误差被扩大；反之，误差被缩小。

2) 减少传动链传动误差的措施

为了减少机床传动链误差对传动精度的影响，可采取下列措施。

(1) 缩短传动链。 由实例分析 2-6 可知，传动链中的传动副越少，传动链越短，误差也越小。

(2) 尽量采用降速传动。在实例分析 2-6 中，如果从传动链的中间轴往传动链两端传的各传动副均为降速传动，则中间传动副的误差反映到末端件是缩小的，且表现为高频误差。如为升速，则误差将会扩大。

(3) 合理地分配各传动副的传动比。降速传动可以缩小前面各传动副的传动误差，而

末端传动副的传动比若小于1，则可使得前面所有的传动副的传动误差都缩小。因此，应使末端传动件的传动比在这一路中是最小的。

(4) 提高传动元件精度，特别是末端元件的制造和装配精度。误差传递规律的分析说明，不是所有各传动副的精度对加工误差都具有相同的影响。中间传动副的误差在传递过程中，都被缩小了。只有末端传动副的误差直接反映到执行件上，对加工精度影响最大。因此，末端传动副的精度要高于中间传动副。

(5) 合理选择传动机件。内联系传动链中不能有传动比不准确的传动副，如摩擦传动副。

(6) 采用校正装置。为了进一步提高精度，可以采用校正装置。校正装置的实质是在原传动链中人为地加入一误差，其大小与传动链本身的误差相等而方向相反，从而使之相互抵消。

3. 机床导轨导向误差

导轨导向精度是指机床导轨副的运动件实际运动方向与理想运动方向的符合程度，两者之间的偏差值称为导向误差。

导轨是机床中确定主要部件相对位置的基准，也是运动的基准，它的各项误差直接影响被加工工件的精度。在机床的精度标准中，直线导轨的导向精度一般包括下列主要内容。

(1) 导轨在水平面内的直线度 Δy (弯曲)如图2.12所示。

(2) 导轨在垂直面内的直线度 Δz (弯曲)如图2.12所示。

(3) 前后导轨的平行度 δ (扭曲)。

(4) 导轨对主轴回转轴线的平行度(或垂直度)。

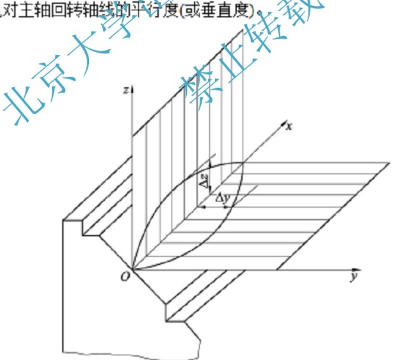
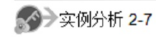


图2.12　导轨的直线度

导轨导向误差对不同的加工方法和加工对象，将会产生不同的加工误差。在分析导轨导向误差对加工精度影响时，主要应考虑导轨误差引起刀具与工件在误差敏感方向的相对位移。



实例分析 2-7

在卧式车床上车削圆柱面时，误差的敏感方向在水平方向。

(1) 如果床身导轨在水平面内存在导向误差 Δy (图 2.13)，Δy 将直接反映在工件加工表面法线方向(误差敏感方向)上，所引起的加工半径误差 ΔR_y 为：

$$\Delta R_y = \Delta y$$

对加工精度影响最大。刀尖在水平面内的运动轨迹造成工件轴向形状误差。

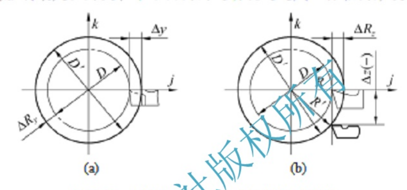


图 2.13　导向误差对车削圆柱面精度的影响

(2) 如果床身导轨在垂直面内存在导向误差 Δz，在加工工件直径为 D 时，Δz 引起的加工半径误差为 ΔR_z，则

$$(R+\Delta R_z)^2 = (\Delta z)^2 + R^2$$

忽略 $(\Delta R_z)^2$ 项，可得

$$\Delta R_z \approx (\Delta z)^2 / D$$

Δz 在误差的非敏感方向上，ΔR_z 为 Δz 的二次方误差，数值很小，对工件的尺寸和形状误差影响比 Δy 小得多。若设 $\Delta z = 0.1$mm，D=40mm，则 $\Delta R_z = 0.00025$mm，影响可忽略不计。

(3) 如果前后导轨不平行(扭曲)，刀具和工件之间相对位置发生变化，刀尖运动轨迹是一条空间曲线，使工件产生形状误差如图 2.14 所示。则加工半径误差为：

$$\Delta R = \Delta y_r = \alpha H \approx \delta H / B$$

式中　H——车床中心高；

B——导轨宽度；

α——导轨倾斜角；

δ——前后导轨的扭曲量。

一般车床 $H/B \approx 2/3$，外圆磨床 $H/B \approx 1$，因此导轨扭曲量 δ 引起的加工误差不可忽略。当 α 角很小时，该误差不显著。

(4) 如果导轨对主轴回转轴线不平行，在加工过程中，根据二者不平行的方向不同，对加工半径误差的影响也不同，分析方法和(1)、(2)类似，此处略去。

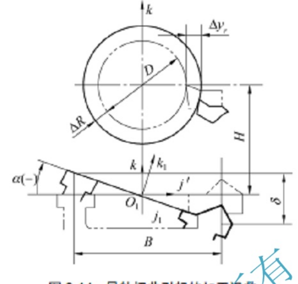


图 2.14　导轨扭曲引起的加工误差

刨床的误差敏感方向为垂直方向。因此，床身导轨在垂直平面内的直线度误差影响较大。它引起加工表面的直线度及平面度误差(图 2.15)。

镗床误差敏感方向是随主轴回转而变化的，故导轨在水平面及垂直面内的直线度误差均直接影响加工精度。在普通镗床上镗孔时，如果以镗刀杆为进给方式进行镗削，那么导轨不直、扭曲或者与镗杆轴线不平行等误差，都会引起镗出的孔与其基准的相互位置误差，而不会产生孔的形状误差；如果工作台进给，那么导轨不直或扭曲，都会引起所加工孔的轴线不直。当导轨与主轴回转轴线不平行时，则镗出的孔呈椭圆形。图 2.16 表示二者的夹角为 α，则椭圆长短轴之比为：$a/b=\cos\alpha$。

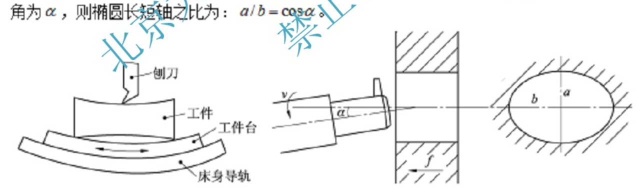


图 2.15　刨床导轨在垂直面内的直线度误差引起的加工误差　　　　图 2.16　镗床镗出椭圆孔

机床安装不正确所引起的导轨误差，往往远大于制造误差。特别是长度较大的龙门刨床、龙门铣床和导轨磨床等，它们的床身导轨是一种细长的结构，刚性较差，在本身自重的作用下就容易变形。如果安装不正确，或者地基不良，都会造成导轨弯曲变形(严重的可达 2~3mm)。

导轨磨损是造成导轨误差的另外一个重要原因。由于使用程度不同及受力不均，机床使用一段时间后，导轨沿全长上各段的磨损量不等，并且在同一横截面上各导轨面的磨损量也不相等。导轨磨损会引起床鞍在水平面和垂直面内发生位移，且有倾斜，从而造成切削刃位置误差。

机床导轨副的磨损与工作的连续性、负荷特性、工作条件、导轨的材质和结构等有关。一般卧式车床，两班制使用一年后，前导轨(三角形导轨)磨损量可达 0.04～0.05mm；粗加工条件下，磨损量可达 0.1～0.2mm。车削铸铁件，导轨磨损更大。

影响导轨导向精度的因素还有加工过程中力、热等方面的原因。

为了减小导向误差对加工精度的影响，机床设计与制造时，应从结构、材料、润滑、防护装置等方面采取措施以提高导向精度和精度的保持性；机床安装时，应校正好水平和保证地基质量；使用时，要注意调整导轨配合间隙，同时保证良好的润滑和维护。

特别提示

除导轨制造误差外，导轨的不均匀磨损和安装质量，也是造成导轨误差的重要因素。导轨磨损是机床精度下降的主要原因之一。

可采用耐磨合金铸铁、镶钢导轨、贴塑导轨、滚动导轨、导轨表面淬火等措施。

2.3.2　夹具的制造误差与磨损

夹具的误差主要包括以下几个方面。

(1) 定位元件、刀具导向元件、分度机构、夹具体等的制造误差。

(2) 夹具装配后，以上各种元件工作面间的相对尺寸误差。

(3) 夹具在使用过程中工作表面的磨损。

夹具误差将直接影响工件加工表面的位置精度或尺寸精度。例如，图 2.17 所示为一钻孔夹具。钻套中心至夹具体上定位平面间的距离误差，直接影响工件孔至工件底平面的尺寸精度；钻套中心线与夹具体上定位平面间的平行度误差，直接影响工件孔中心线与工件底平面的平行度；钻套孔的直径误差亦将影响工件孔至底平面的尺寸精度与平行度。

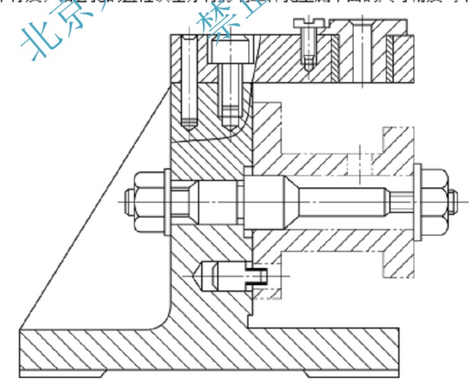


图 2.17　钻孔夹具

一般来说，夹具误差对加工表面的位置误差影响最大。在设计夹具时，凡影响工件精度的尺寸应严格控制其制造误差，精加工用夹具一般可取工件上相应尺寸或位置公差的1/2～1/3，粗加工用夹具则可取为1/5～1/10。

2.3.3 刀具的制造误差与磨损

刀具误差对加工精度的影响，因刀具的种类不同而有所差异。

(1) 采用定尺寸刀具(如钻头、铰刀、键槽铣刀、镗刀块及圆拉刀等)加工时，刀具的尺寸精度直接影响工件的尺寸精度。

(2) 采用成形刀具(如成形车刀、成形铣刀、成形砂轮等)加工时，刀具的形状精度将直接影响工件的形状精度。

(3) 展成刀具(如齿轮滚刀、花键滚刀、插齿刀等)的切削刃形状必须是加工表面的共轭曲线。因此，切削刃的形状误差会影响加工表面的形状精度。

(4) 对于一般刀具(如车刀、镗刀、铣刀)，其制造精度对加工精度无直接影响，但这类刀具的寿命较低，刀具容易磨损。

任何刀具在切削过程中都不可避免地要产生磨损，并由此引起工件尺寸和形状误差。例如，用成形刀具加工时，刀具刃口的不均匀磨损将直接反映在工件上，造成形状误差；在加工较大表面(一次走刀需较长时间)时，刀具的尺寸磨损会严重影响工件的形状精度；用调整法加工一批工件时，刀具的磨损会扩大工件尺寸的分散范围。

刀具的尺寸磨损是指切削刃在加工表面的法线方向(即误差敏感方向)上的磨损量μ(图2.18)，它直接反映出刀具磨损对加工精度的影响。

刀具尺寸磨损的过程可分为3个阶段(图2.19)：初期磨损(切削路程$l < l_0$)、正常磨损($l_0 < l < l'$)和急剧磨损($l > l'$)。在正常磨损阶段，尺寸磨损与切削路程成正比。在急剧磨损阶段，刀具已不能正常工作，因此，在到达急剧磨损阶段前就必须重新磨刀。

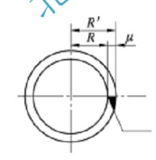


图2.18　刀具的尺寸磨损

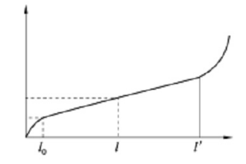


图2.19　刀具尺寸磨损的过程

2.3.4 调整误差

在机械加工的每一个工序中，总是要对工艺系统进行这样或那样的调整工作。由于调整不可能绝对地准确，因而产生调整误差。

不同的调整方法有不同的误差来源。工艺系统的调整有两种基本的方法。

1. 试切法调整

单件、小批生产中普遍采用试切法加工。加工时先在工件上试切，根据测得的尺寸与

要求尺寸的差值，用进给机构调整刀具与工件的相对位置，然后再进行试切、测量、调整，直至符合规定的尺寸要求时，再正式切削出整个待加工表面。显然，这时引起调整误差的因素有以下三方面。

1) 测量误差

指量具本身的精度、测量方法或使用条件下的误差(如温度影响、操作者的细心程度)等，它们都影响调整精度，因而产生加工误差。

2) 机床进给机构的位移误差

当试切最后一刀时，往往要按刻度盘的显示值来微调刀架的进给量，这时常会出现进给机构的“爬行”现象，结果使刀具的实际位移与刻度盘显示值不一致，造成加工误差。

3) 试切与正式切削时切削层厚度不同的影响

不同材料的刀具的刃口半径是不同的，也就是说，切削加工中切削刃所能切除的最小切削层厚度是有一定限度的。切削厚度过小时，切削刃就会在切削表面上打滑，切不下金属。精加工时，试切的最后一刀往往很薄，而正式切削时的背吃刀量一般要大于试切部分，所以与试切时的最后一刀相比，切削刃不容易打滑，实际切深就大一些，因此工件尺寸就与试切部分不同；粗加工时，试切的最后一刀切削层厚度还较大，切削刃不会打滑，但正式切削时背吃刀量更大，受力变形也大得多，因此正式切削时切除的金属厚度就会比试切时小一些，故同样引起工件的尺寸误差。

2. 调整法

在成批、大量生产中，广泛采用试切法(或样件、样板)预先调整好刀具与工件的相对位置，并在一批零件的加工过程中保持这种相对位置不变获得所要求的零件尺寸。与采用样件(或样板)调整相比，采用试切调整比较符合实际加工情况，故可得到较高的加工精度，但调整时费时。因此实际使用时可先根据样件(或样板)进行初调，然后试切若干工件，根据试切情况作精确微调。这样既缩短了调整时间，又可得到较高的加工精度。

由于采用调整法对工艺系统进行调整时，也要以试切为依据，因此上述影响试切法调整精度的因素，同样也对调整法有影响。此外，影响调整精度的因素还包括以下几点。

1) 定程机构误差

在大批大量生产中广泛采用行程挡块、靠模、凸轮等机构保证加工尺寸。这时候，这些定程机构的制造精度和调整，以及与它们配合使用的离合器、电气开关、控制阀等的灵敏度就成为调整误差的主要来源。

2) 样件或样板误差

包括样件的制造误差、安装误差和对刀误差，这些也是影响调整精度的重要因素。

3) 测量有限试件造成的误差

工艺系统初调好以后，一般都要试切几个工件，并以其平均尺寸作为判断调整是否准确的依据。由于试切加工的工件数(称为抽样件数)不可能太多，因此不能把整批工件切削过程中各种随机误差完全反映出来。故试切加工几个工件的平均尺寸与总体尺寸不可能完全符合，因而造成误差。

一次调整后存在的误差对这一批零件的影响是不变的。但大批量加工中存在多次调整，不可能每次完全相同。

对全部零件来说，每次调整误差为随机误差。机床调整误差可理解为零件尺寸分布曲线中心的最大偏移量。如图 2.20 所示，加工中不产生废品的条件为：

$$\Delta_{fb} + \Delta_t \leqslant T \tag{2-1}$$

式中　Δ_{fb} ——零件尺寸分布曲线的范围；

Δ_t ——零件尺寸分布曲线中心的的偏移量；

T ——零件的公差带。

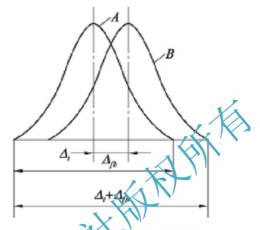


图 2.20　两次调整的分布曲线

2.4　工艺系统的受力变形对加工精度的影响及其控制

2.4.1　工艺系统刚度的概念

切削加工时，由机床、刀具、夹具和工件组成的工艺系统，在切削力、夹紧力、传动力、重力和惯性力等的作用下，会产生变形，使刀具和工件在静态下调整好的相互位置，以及切削成形运动所需要的正确几何关系发生变化，而造成加工误差。

如图 2.21 所示，在车削细长工件时，工件在切削力的作用下会产生变形，使得加工出的工件变成鼓形，如图 2.21(a)所示；在镗孔时，由于镗刀主轴的受力弯曲，镗出的孔会变成如图 2.21(b)所示形状。

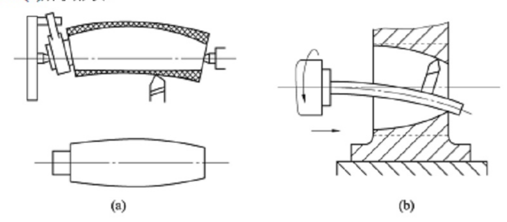


图 2.21　工艺系统受力变形引起的加工误差

由此可见，工艺系统的受力变形是加工中一项很重要的原始误差。事实上，它不仅严

重地影响工件加工精度，而且还影响加工表面质量，限制加工生产率的提高。

工艺系统受力变形通常是弹性变形。一般来说，工艺系统抵抗弹性变形的能力越强，则加工精度越高。工艺系统抵抗变形的能力，用刚度 k(N/mm)来描述。所谓工艺系统刚度，是指工件加工表面在切削力法向方向的分力 F_y 与刀具相对工件在该方向上位移 y 的比值：

$$k=\frac{F_y}{y} \tag{2-2}$$

必须指出，在上述刚度的定义中，工件和刀具在 y 方向产生的相对位移 y，不只是 F_y 作用的结果，而是多种分力同时作用下的综合结果。

2.4.2　工艺系统刚度的计算

切削加工时，机床的有关部件、夹具、刀具和工件在各种外力作用下，都会产生不同程度的变形，使刀具和工件的相对位置发生变化，从而产生相应的加工误差。

工艺系统在某一处的法向总变形 y 是各个组成环节在同一处的法向变形的叠加，所以，工艺系统总的变形为：

$$y=y_{机床}+y_{夹具}+y_{刀具}+y_{工件} \tag{2-3}$$

式中，y 的下标表示发生受力变形的各组成环节。

由刚度定义可写出：

$$k_{机床}=\frac{F_y}{y_{机床}}，k_{夹具}=\frac{F_y}{y_{夹具}}，k_{刀具}=\frac{F_y}{y_{刀具}}，k_{工件}=\frac{F_y}{y_{工件}}$$

代入式(2-3)可得：

$$\frac{1}{k}=\frac{1}{k_{机床}}+\frac{1}{k_{夹具}}+\frac{1}{k_{刀具}}+\frac{1}{k_{工件}} \tag{2-4}$$

可知，已知工艺系统各组成环节的刚度，即可求得工艺系统的刚度。

1．工件、刀具的刚度

当工件、刀具的形状比较简单时，其刚度可以用材料力学中的有关公式求得，结果和实际出入不大。例如，装夹在卡盘中的棒料以及压紧在车床刀架上的车刀，可以按照悬臂梁公式把它们的刚度计算出来：

$$y_1=\frac{F_yL^3}{3EI}，\quad k_1=\frac{3EI}{L^3} \tag{2-5}$$

又如，支承在两顶尖间加工的棒料，可以用简支梁的公式求出它的刚度：

$$y_2=\frac{F_yL^3}{48EI}，\quad k_2=\frac{48EI}{L^3} \tag{2-6}$$

式(2-5)和式(2-6)中，

L——工件(刀具)长度，mm；

E——材料的弹性模量，N/mm^2；

I——工件(刀具)的截面惯性矩，mm^4；

y_1——外力作用在梁端点的最大位移，mm；

y_2——外力作用在梁中点的最大位移，mm。

2. 机床、夹具的刚度

对于由若干个零件组成的机床部件及夹具，其刚度多采用实验的方法测定，而很难用纯粹的计算方法求出。

特别提示

在用式(2-4)计算工艺系统刚度时，应针对具体情况加以简化。例如，车削外圆时，车刀本身在切削力作用下的变形，对加工误差的影响很小，可略去不计，故工艺系统刚度的计算式中可省掉刀具刚度一项。又如镗孔时，镗杆的受力变形严重地影响着加工精度，而工件的刚度一般较大，其受力变形很小，故也可忽略不计。

2.4.3 工艺系统刚度对加工精度的影响

1. 切削力作用点位置变化引起的工件形状误差

切削过程中，工艺系统的刚度会随切削力作用点位置的变化而变化，因此使工艺系统受力变形亦随之变化，引起工件形状误差。下面以车床顶尖间加工光轴为例来说明这个问题。

1) 机床的变形

假定工件短而粗，同时车刀悬伸长度很短，即工件和刀具的刚度好，其受力变形比机床的变形小到可以忽略不计。也就是说，假定工艺系统的变形只考虑机床的变形，又假定工件的加工余量很均匀，并且由于机床变形而造成的背吃刀量(切削深度)变化对切削力的影响也很小，即假定车刀进给过程中切削力保持不变。再设当车刀以径向力 F_y 进给到如图 2.22 所示的 x 位置时，车床主轴箱受作用力 F_A，相应的变形 $y_{tj}=\overline{AA'}$；尾座受力 F_B，相应的变形 $y_{wz}=\overline{BB'}$；刀架受力 F_y，相应的变形 $y_{dj}=\overline{CC'}$。这时工件轴心线 AB 位移到 $A'B'$，因而刀具切削点处工件轴线的位移 y_x 为：

$$y_x=y_{tj}+\Delta x=y_{tj}+(y_{wz}-y_{tj})\frac{x}{L}$$

式中　L——工件长度；

　　　x——车刀到主轴箱的距离。

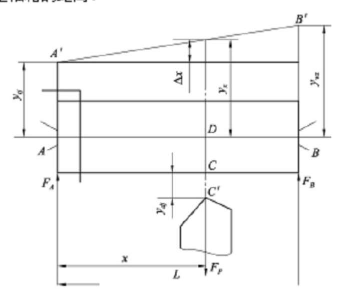


图 2.22　工艺系统变形随切削力位置变化而变化

考虑到刀架的变形 y_{dj} 与 y_x 的方向相反，所以机床总的变形为：

$$y_{jc}=y_x+y_{dj} \tag{2-7}$$

由刚度定义有：$y_{tj}=\frac{F_A}{k_{tj}}=\frac{F_y}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)$，$y_{wz}=\frac{F_B}{k_{wz}}=\frac{F_y}{k_{wz}}\frac{x}{L}$，$y_{dj}=\frac{F_y}{k_{dj}}$

式中　k_{tj}、k_{wz}、k_{dj}——分别为主轴箱、尾座、刀架的刚度。

代入式(2-7)，可得机床的总变形为：

$$y_{jc}=F_y\left[\frac{1}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{dj}}\right]=y_{jc}(x)$$

这说明，随着切削力作用点位置的变化，工艺系统的变形是变化的。显然这是由于工艺系统的刚度随切削力作用点变化而变化所致。

当 $x=0$ 时：$y_{jc}=F_y\left(\frac{1}{k_{tj}}+\frac{1}{k_{dj}}\right)$

当 $x=L$ 时：$y_{jc}=F_y\left(\frac{1}{k_{wz}}+\frac{1}{k_{dj}}\right)=y_{max}$

当 $x=L/2$ 时：$y_{jc}=F_y\left(\frac{1}{4k_{tj}}+\frac{1}{4k_{wz}}+\frac{1}{k_{dj}}\right)$

还可以求出当 $x=\left(\frac{k_{tj}}{k_{tj}+k_{wz}}\right)L$ 时，机床变形最小：

$$y_{jc}=y_{min}=F_y\left(\frac{1}{k_{tj}+k_{wz}}+\frac{1}{k_{dj}}\right)$$

由于变形大的地方，从工件上切去的金属层薄，变形小的地方，切去的金属层厚，因此由机床受力变形而使加工出来的工件呈两端粗、中间细的鞍形，如图 2.23 所示。

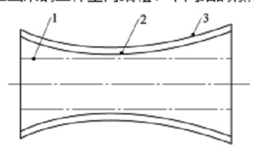


图 2.23　工件在顶尖上车削后的形状

1—机床不变形的理想状态　2—考虑主轴箱、尾座变形的情况　3—包括考虑刀架变形在内的情况

2) 工件的变形

若在两顶尖间车削刚性很差的细长轴，则工艺系统中工件变形必须考虑。假设此时不考虑机床和刀具的变形，即可由材料力学公式计算在切削点的变形量：

$$y_g=\frac{F_y}{3EI}\frac{(L-x)^2x^2}{L}$$

显然，当 $x=0$ 或 $x=L$ 时，$y_g=0$；当 $x=L/2$时，工件刚度最小、变形最大：$y_{g\max}=\dfrac{F_yL^3}{48EI}$。因此加工后的工件呈鼓形。

3) 工艺系统的总变形

当同时考虑机床和工件的变形时，工艺系统的总变形为二者的叠加(对于本例，车刀的变形可以忽略)：

$$y=y_{jc}+y_g=F_y\left[\frac{1}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{dj}}+\frac{(L-x)^2x^2}{3EIL}\right]$$

工艺系统的刚度：

$$k=\frac{F_y}{y_{jc}+y_g}=\frac{1}{k_{tj}}\left(\frac{L-x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{wz}}\left(\frac{x}{L}\right)^2+\frac{1}{k_{dj}}+\frac{(L-x)^2x^2}{3EIL}$$

从以上分析过程中，可得到如下结论。

(1) 实际在 x 处得到的工件半径 $R_x=R+y_{dj}+y_x+y_g$，此时存在的工件半径误差等于工艺系统的总变形，即 $\Delta R=R_x-R=y_{dj}+y_x+y_g=y$。

(2) 一次走刀中若 y 为常量，不会造成工件形状误差和尺寸变化。

(3) 如果工件刚性很大，如长度和直径之比 $L/D\leqslant5$，可不考虑 y_g，此时 $y_{系}$是 x 的二次函数，圆柱度误差为 $\varDelta=y_{\max}-y_{\min}$。

(4) 若工件为细长轴，刚性很差，系统变形主要是工件变形，当 $x=L/2$ 时，$y_{g\max}=\dfrac{F_yL^3}{48EI}$。

由此可知，测得了车床主轴箱、尾座、刀架3个部件的刚度，以及确定了工件的材料和尺寸，就可以按 x 值，估算车削圆轴时工艺系统的刚度。当已知刀具的切削角度、切削条件和切削用量，即可知道切削力 F_y，利用上面的公式就可以估算出不同 x 处工件半径的变化。

工艺系统刚度随受力点位置变化而变化的例子很多，如立式车床、龙门刨床、龙门铣床等的横梁及刀架、大型镗铣床滑枕内的主轴等，其刚度均随刀架位置或滑枕伸出长度不同而异，对它们的分析可以参照上例方法进行。

2. 切削力大小变化引起的加工误差

在车床上加工短轴，工艺系统的刚度变化不大，可近似地看作常量。这时如果毛坯形状误差较大或材料硬度很不均匀，工件加工时切削力的大小就会有较大变化，工艺系统的变形也就会随切削力大小变化而变化，因而引起工件加工误差。下面以车削椭圆形横截面毛坯为例(如图2.24所示)进行分析。

加工时，刀具调整到一定的背吃刀量(图中双点划线圆的位置)。在工件每转一转中，背吃刀量发生变化，最大背吃刀量 a_{p_1}，最小背吃刀量 a_{p_2}。假设毛坯材料的硬度是均匀的，那么 a_{p_1} 处的切削力 F_{y_1} 最大，相应的变形 y_1 也最大；a_{p_2} 处的切削力 F_{y_2} 最小，相应的变形 y_2 也最小。由此可见，当车削具有圆度误差为 $\Delta m=a_{p_1}-a_{p_2}$ 的毛坯时，由于工艺系统受力变形的变化而使工件产生相应的圆度误差 $\Delta g=y_1-y_2$，这种现象叫做“误差复映”。

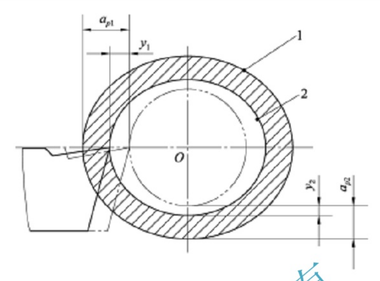


图 2.24 车削时的误差复映

1—毛坯外形 2—工件外形

如果工艺系统的刚度为 k，则工件的圆度误差：

$$\Delta g = y_1 - y_2 = \frac{1}{k}(F_{y_1} - F_{y_2}) \tag{2-8}$$

由切削原理可知：

$$F_y = C_{F_y} a_p^{xF_y} f^{yF_y} (HB)^{nF_y}$$

式中 C_{F_y} ——与刀具几何参数及切削条件(刀具材料、工件材料、切削种类、切削液等)有关的系数；

a_p ——背吃刀量；

f ——进给量；

HB ——工件材料硬度；

xF_y 、 yF_y 、 nF_y ——指数。

在工件材料硬度均匀，刀具、切削条件和进给量一定的情况下，$C_{F_y} f^{yF_y} (HB)^{nF_y} = C$ 为常数。在车削加工中，$xF_y \approx 1$，于是切削分力 F_y 可写成 $F_y = Ca_p$，因此：

$$F_{y1} = Ca_{p_1} \qquad F_{y2} = Ca_{p_2}$$

代入式(2-8)得：

$$\Delta g = \frac{C}{k}(a_{p_1} - a_{p_2}) = \frac{C}{k}\Delta m = \varepsilon \Delta m \tag{2-9}$$

式中 $\varepsilon = \frac{C}{k}$、$\varepsilon = \frac{\Delta g}{\Delta m}$

称为误差复映系数。由于 Δg 总是小于 Δm，所以 ε 是一个小于 1 的正数。它定量地反映了毛坯误差经加工后所减少的程度。减少 C 或增大 k 都能使 ε 减小。例如，减小进给量 f，即可减少 C，使 ε 减小，又可提高加工精度，但切削时间增长。如果设法增大工艺系统刚度 k，不但能减小加工误差 Δg，而且可以在保证加工精度前提下相应增大进给量，提高生产率。

增加走刀次数可大大减小工件的复映误差，设 ε_1，ε_2，ε_3，…分别为第一次、第二次、第三次……走刀时的误差复映系数，则：

$$\Delta g_1 = \varepsilon_1 \Delta m$$

$$\Delta g_2 = \varepsilon_2 \Delta g_1 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \Delta m$$

$$\Delta g_3 = \varepsilon_3 \Delta g_2 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \Delta m$$

$$\vdots$$

总的误差复映系数：

$$\varepsilon_{总} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \cdots$$

由于 ε_i (i=1，2，3，…)是一个小于1的正数，多次走刀后 $\varepsilon_{总}$ 就变成一个远远小于1的系数。多次走刀可以提高加工精度，但也意味着生产率降低。

由以上分析可知，当工件毛坯有形状误差(如圆度、圆柱度、直线度等)或相互位置误差(如偏心、径向跳动等)时，加工后仍然会有同类的加工误差出现。在成批大量生产中用调整法加工一批工件时，如毛坯尺寸不一，那么加工后这批工件仍有尺寸不一的误差。

毛坯硬度不均匀，同样会造成加工误差。在采用调整法成批生产情况下，控制毛坯材料硬度的均匀性是很重要的。因为加工过程中走刀次数通常已定，如果一批毛坯材料的硬度差别很大，就会使工件的尺寸分散范围扩大，甚至超差。

3. 夹紧力和重力引起的加工误差

工件在装夹时，由于工件刚度较低或夹紧力着力点不当，会使工件产生相应的变形，造成加工误差。如图2.25所示为用三爪卡盘夹持薄壁套筒夹紧变形误差，假定坯件是正圆形，夹紧后坯件呈三棱形，虽镗出的孔为正圆形，但松开后，套筒弹性恢复使孔又变成三棱形(图2.25(c))。为了减少加工误差，应使夹紧力均匀分布，可采用开口过渡环(图2.25(d))或采用专用卡爪(图2.25(e))夹紧。

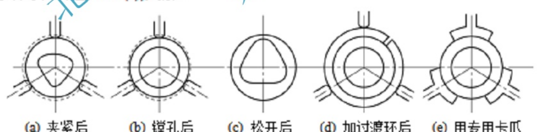


图2.25　三爪卡盘薄壁套筒夹紧变形误差

又如，磨削薄片零件，假定坯件翘曲，当它被电磁工作台吸紧时，产生弹性变形，磨削后取下工件，由于弹性恢复，使已磨平的表面又产生翘曲(图2.26(a)、(b)、(c))。改进的办法是在工件和磁力吸盘之间垫入一层薄橡胶皮(0.5mm以下)或纸片(图2.26(d)、(e))，当工作台吸紧工件时，橡皮垫受到不均匀的压缩，使工件变形减少，翘曲的部分就将被磨去。如此进行，正反面轮番多次磨削后，就可得到较平的平面。

如图2.27所示加工发动机连杆大头孔的装夹示意图，由于夹紧力作用点不当，造成加工后两孔中心线不平行及其与定位端面不垂直。

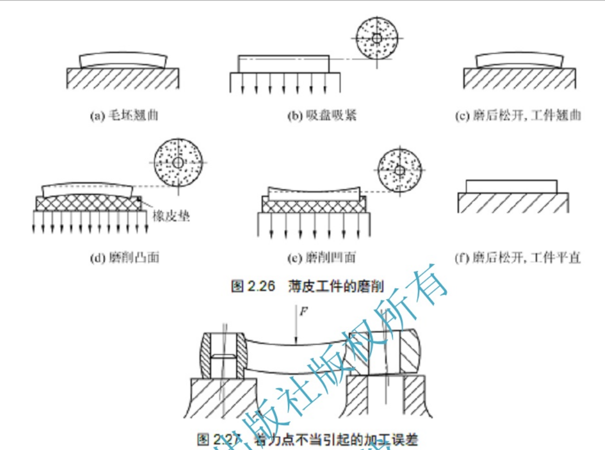


图 2.26　薄皮工件的磨削

图 2.27　着力点不当引起的加工误差

工艺系统有关零部件自身重力所引起的相应变形，也会造成加工误差。如图 2.28(a)、(b) 所示大型立车在刀架的自重下引起了横梁变形，造成了工件端面的平面度误差和外圆上的锥度误差。工件的直径越大，加工误差也越大。



图 2.28　机床部件自重所引起的误差

对于大型工件的加工(如磨削床身导轨面)，工件自重引起的变形有时成为产生加工形状误差的主要原因。在实际生产中，装夹大型工件时，恰当地布置支承可以减小自重引起的变形。图 2.29 表示了两种不同支承方式下，均匀截面的挠性工件的自重变形规律。显然，第二种支承方式工件重量引起的变形要大大小于第一种方式。

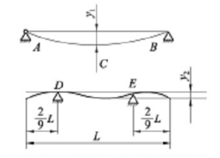


图 2.29　工件自重所造成的误差

4．传动力和惯性力对加工精度的影响

1) 传动力影响

在车床上用单爪拨盘带动工件时，传动力在拨盘的每一转中不断改变方向。图 2.30(a)表示了单爪拨盘传动的结构简图和作用在其上的力：切削分力 F_y、F_z 和传动力 F_c。图 2.30(b)表示了切削力转化到作用于工件几何轴心 O 点上而使之变形到 O' 点，又由传动力转化到作用于 O' 点上而使之变形到 O'' 点的位置。图中 k_s 为机床系统的刚度，k_c 为顶尖系统的接触刚度(包括顶尖与主轴孔、顶尖与工件顶尖孔之间的接触刚度)。由图可得：

$$r_0^2 = \overline{OA}^2 + \overline{OO'}^2 + 2\overline{OA}\,\overline{OO'}\cos\beta \qquad \beta = \tan^{-1}\frac{F_z/k_s}{F_y/k_s} = \tan^{-1}\frac{F_z}{F_y}$$

只要切削分力 F_y、F_z 不变，则 β、$\overline{OO'}$ 也不变、$\overline{OA}$ 又是恒值，所以 r_0 是恒值，它和旋转力 F_c 无关。因此 O' 点是工件的平均回转轴心，O'' 点围绕 O' 点作与主轴同频率的回转，恰似一个在 yz 平面内的偏心运动。整个工件则在空间作圆锥运动：固定的后顶尖为其锥角顶点，前顶尖带着工件在空间画出了一个圆。这就是主轴几何轴线具有角度摆动的第一种情况——几何轴线(前后顶尖的连线)相对于平均轴线(O' 点与后顶尖的连线)在空间成一定锥角的圆锥轨迹。由此可以得出结论：在单爪拨盘传动下车削出来的工件是一个正圆柱，并不产生加工误差。以前认为将形成截面形状为心脏形的圆柱度误差的结论是不正确的。在圆度仪上对工件进行实测的结果也证明了这一点。

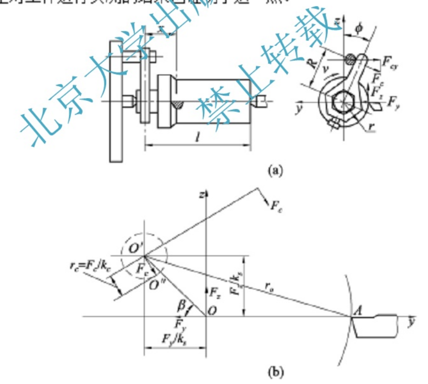


图 2.30 单爪拨盘传动下工件的受力与变形

2) 惯性力的影响

在高速切削时，如果工艺系统中有不平衡的高速旋转的构件存在，就会产生离心力。它和传动力一样，在工件的每一转中不断改变方向，引起工件几何轴线作摆角运动，故理

论上讲也不会造成工件圆度误差。但是要注意的是当不平衡质量的离心力大于切削力时，车床主轴轴颈和轴套内孔表面的接触点就会不停地变化，轴承孔的圆度误差将传给工件的回转轴心。

周期变化的惯性力还常常引起工艺系统的强迫振动。

因此机械加工中若遇到这种情况，可采用“配重平衡”的方法来消除这种影响，即在不平衡质量的反向加装配重块，使两者的离心力相互抵消。必要时也可适当降低转速，以减少离心力的影响。

2.4.4 机床部件刚度

1. 机床部件刚度的测定

1) 静载荷测定法

简单零件的刚度可用材料力学公式进行估算，但是对于一个由许多零件组成的机床部件而言，它的刚度计算问题就非常复杂，迄今还没有合适的简易计算方法，目前主要还是用实验方法来测定机床部件的刚度。刚度的静载荷测定法是在机床不工作状态下，模拟切削时的受力情况，对机床施加静载荷，然后测出机床各部件在不同静载荷下的变形，就可作出各部件的刚度特性曲线并计算出刚度。

最简单的测定车床刚度的实验方法是如图 2.31 所示的单向静载荷测定法。在车床顶尖间装一个刚性很好的心轴 1，在刀架上装一个螺旋加力器 5，在加力器与心轴之间装一测力环 4，当转动加力器的加力螺钉时，刀架与心轴之间便产生了作用力，力的大小由测力环中的千分表读出。作用力一方面传到车床刀架上，另一方面经过心轴传到前后顶尖上。若加力器 5 位于心轴的中点，如通过加力器对工件施加力 F_y，则主轴箱和尾座各受到 $F_y/2$ 力的作用。主轴箱、尾座和刀架的变形可分别由千分表 2、3、6 读出。

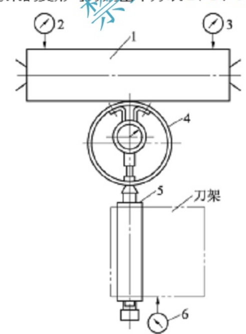


图 2.31　车床刚度单向静载荷测定法

1—心轴　2、3、6—千分表　4—测力环　5—螺旋加力器

图 2.32 所示为一台中心高 200mm 车床的刀架部分刚度实测曲线。实验中进行了次加载-卸载循环。由图可以看出机床部件的刚度曲线有以下特点。

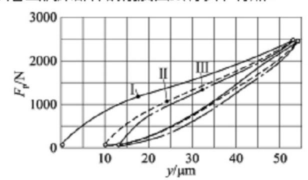


图 2.32　车床刀的架静刚度特性曲线

I —一次加载　II —二次加载　III—三次加载

(1) 力和变形之间不服从虎克定律关系，变形与作用力不是线性关系，曲线上各点的实际刚度(各点的斜率)是不同的，这说明刀架变形不纯粹是弹性变形。

(2) 加载与卸载曲线不重合，两曲线间包容的面积代表了加载-卸载循环中所损失的能量，也就是消耗在克服部件内零件间的摩擦和接触变形所做的功。

(3) 卸载后曲线不回到原点，这说明部件的变形不单纯是弹性变形，而且还产生了不能恢复的残余变形。在反复加载-卸载后，残余变形才逐渐接近于零。

(4) 部件的实际刚度远比按实体所估计的要小。

由于机床部件的刚度曲线不是线性的，其刚度 $k=\mathrm{d}F/\mathrm{d}y$ 就不是常数。通常所说的部件刚度是指它的平均刚度——曲线两端点连线的斜率。对本例，刀架的(平均)刚度是：

$$k = 2400/0.052\text{N/mm} = 4600\text{N/mm}$$

单向静载荷测定法简单、方便，但实验中测得的 y 方向的位移只是径向力 F_y 作用下引起的变形，它不能正确地反映实际加工时的情况。实际加工时，除 F_y 引起 y 方向的变形外，F_x、F_z 也引起 y 方向的变形。

三向静载荷测定比单向静载荷测定更接近加工实际情况。图 2.33 所示为三向静载荷测定装置。

在半圆弓形体 1 上每隔 15° 有一螺孔，依照实际加工时切削分力 F_x、F_y 的比例，把加力螺杆 2 旋入相应的螺孔。加力螺杆 2 与可转刀头 14 之间放置测力环 3。再按照所模拟的 F_z、F_y 的比例，将测力装置旋转到相应的位置。然后连续施加载荷，并由头架、尾座及刀架上的 3 个百分表座 4 分别测出相应的变形量。最后绘出各有关部件的刚度曲线，求出在一定载荷范围内的平均刚度。

2) 工作状态测定法

静态测定法测定机床刚度，只是近似地模拟切削时的切削力，与实际加工条件毕竟不完全一样。采用工作状态测定法，比较接近实际。

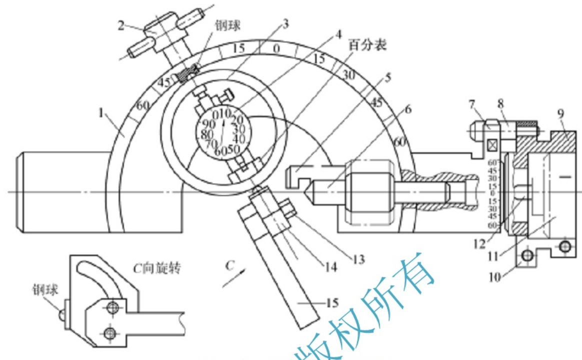


图 2.33　三向静载荷测定装置

1—半圆弓形体　2—加力螺杆　3—测力环　4—百分表座　5—水平对刀块　6—高度对刀块
7—固定销　8—活动销　9—固定套　10—固定螺钉　11—尾座套筒
12—后顶尖　13—夹紧螺钉　14—可转刀头　15—刀杆

工作状态测定法的依据是误差复映规律。如图 2.34 所示，在车床顶尖间装夹一根刚度极大的心轴。心轴靠近前顶尖、后顶尖及中间三处各预先车出一个台阶，3 个台阶的尺寸分别为 H_{11}、H_{12}、H_{21}、H_{22}、H_{31}、H_{32}。经过一次走刀后，由于误差复映，心轴上仍有台阶状残留误差，经测量其尺寸分别为 h_{11}、h_{12}、h_{21}、h_{22}、h_{31}、h_{32}，于是可计算出左、中、右台阶处的误差复映系数：

$$\varepsilon_1 = \frac{h_{11} - h_{12}}{H_{11} - H_{12}} \quad \varepsilon_2 = \frac{h_{21} - h_{22}}{H_{21} - H_{22}} \quad \varepsilon_3 = \frac{h_{31} - h_{32}}{H_{31} - H_{32}}$$

三处的系统刚度分别为：

$$k_{xt_1} = \frac{C}{\varepsilon_1}, \quad k_{xt_2} = \frac{C}{\varepsilon_2}, \quad k_{xt_3} = \frac{C}{\varepsilon_3}$$

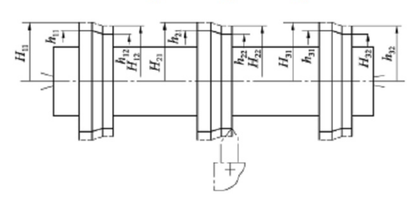


图 2.34　车床刚度的工作状态测定法

由于心轴刚度很大，其变形可忽略，车刀的变形也可忽略，故上面算得的三处系统刚度，就是三处的机床刚度。列出方程组：

$$\begin{cases}\dfrac{1}{k_{xt_1}}=\dfrac{1}{k_{tj}}+\dfrac{1}{k_{dj}}\\[2ex]\dfrac{1}{k_{xt_2}}=\dfrac{1}{4k_{tj}}+\dfrac{1}{4k_{wz}}+\dfrac{1}{k_{dj}}\\[2ex]\dfrac{1}{k_{xt_3}}=\dfrac{1}{k_{wz}}+\dfrac{1}{k_{dj}}\end{cases}$$

解此方程组可得出车床主轴箱、尾座和刀架的刚度分别为：

$$\frac{1}{k_{tj}}=\frac{1}{k_{xt_1}}-\frac{1}{k_{dj}},\qquad \frac{1}{k_{wz}}=\frac{1}{k_{xt_3}}-\frac{1}{k_{dj}},\qquad \frac{1}{k_{dj}}=\frac{2}{k_{xt_2}}-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_{xt_1}}+\frac{1}{k_{xt_2}}\right)$$

工作状态测定法的不足之处是：不能得出完整的刚度特性曲线，而且由于材料不均匀等所引起的切削力变化和切削过程中的其他随机因素，都会给测定的刚度值带来一定的误差。

2. 影响机床部件刚度的因素

1) 连接表面间的接触变形

由于零件表面存在宏观的几何形状误差和微观的表面粗糙度，所以零件间连接表面的实际接触面积只是名义接触面积的一小部分，如图 2.35 所示。在外力的作用下，实际接触区的接触应力很大，因而有较大的接触变形产生。在这类接触变形中，既有表面层的弹性变形，又有局部的塑性变形。经过多次加载—卸载循环作用之后，弹性变形成分越来越大，塑性变形成分越来越小，接触状态就趋于稳定。塑性变形的结果，造成零件之间的间隙增大。

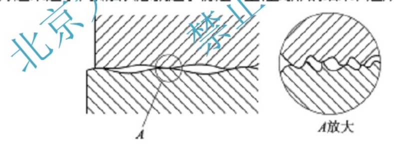


图 2.35　两零件接触面间的接触情况

接触表面间的名义压强的增量与接触变形的增量之比称为接触刚度。零件表面越粗糙，形状误差越大，材料硬度越低，接触刚度越小。

连接表面的接触刚度将随着法向载荷的增加而增大，并受接触表面材料、硬度、表面粗糙度、表面纹理方向，以及表面几何形状误差等因素的影响。机床部件接触刚度的高低，主要取决于机床零部件的加工质量和装配质量。例如，以 500N 的磨削力作用于被磨工件的中间时，若磨床顶尖与主轴锥的加工质量不高，其接触变形有时可高达 6～9 μm，占机床总变形量的 30%～60%。

2) 零件间摩擦力的影响

机床部件受力变形时，零件间连接表面会发生错动，加载时摩擦力阻碍变形发生，卸载时摩擦力阻碍变形的恢复，故造成加载和卸载刚度曲线不重合。

3) 接合面的间隙

部件间各零件间如果有间隙，那么只要受到较小的力(克服摩擦力)就会使零件相互错动，故表现为刚度很低。间隙消除后，相应表面接触，才开始有接触变形和弹性变形，这时就表现为刚度较大，如图 2.36 所示。如果载荷是单向的，机床部件始终靠在一面，那么在第一次加载消除间隙后对加工精度的影响较小；如果载荷不断改变方向(如镗床、铣床的切削力)，那么间隙的影响就不容忽视。而且，因间隙引起的位移，在去除载荷后不会恢复。

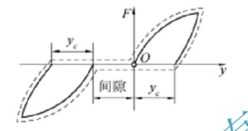
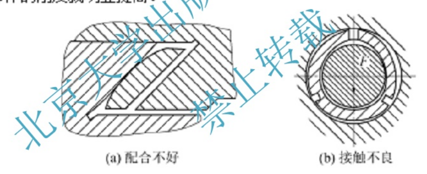


图 2.36　间隙对刚度曲线的影响

4) 薄弱零件本身的变形

在机床部件中，薄弱零件受力变形对部件刚度的影响最大。例如，溜板部件中的楔铁与导轨面配合不好(图 2.37(a))或轴承衬套因形状误差而与壳体接触不良(图 2.37(b))，由于楔铁和轴承衬套极易变形，故造成整个部件刚度大大降低。当这些薄弱环节变形后改善了接触情况，部件的刚度就明显提高。



(a) 配合不好　　(b) 接触不良

图 2.37　部件中的薄弱环节

2.4.5　减小工艺系统受力变形对加工精度影响的措施

减小工艺系统受力变形是保证加工精度的有效途径之一。在生产实际中，常从两个主要方面采取措施来予以解决：一是提高系统刚度；二是减少载荷及其变化。从加工质量、生产效率、经济效益等问题全面考虑，提高工艺系统中薄弱环节的刚度是最重要的措施。

1. 提高工艺系统的刚度

1) 合理的结构设计

在设计工艺装备时，应尽量减少连接面数目，并注意刚度的匹配，防止有局部低刚度环节出现。在设计基础件、支承件时，应合理选择零件结构和截面形状。一般地说，截面积相等时，空心截形比实心截形的刚度高，封闭的截形又比开口的截形好。在适当部位增添加强肋也有良好的效果。

2) 提高连接表面的接触刚度

由于部件的接触刚度大大低于实体零件本身的刚度，所以提高接触刚度是提高工艺系统刚度的关键。特别是对在使用中的机床设备，提高其连接表面的接触刚度，往往是提高原机床刚度的最简便、最有效的方法。

(1) 提高机床部件中零件间接合表面的质量。

提高机床导轨的刮研质量，提高顶尖锥柄同主轴和尾座套筒锥孔的接触质量等都能使实际接触面积增加，从而有效地提高表面的接触刚度。

(2) 给机床部件以预加载荷。

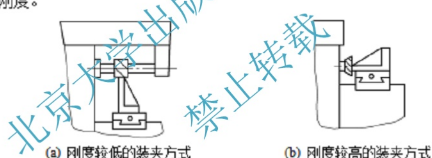
此措施常用在各类轴承、滚珠丝杠螺母副的调整之中。给机床部件以预加载荷，可消除接合面之间间隙，增加接触面积，减少受力后的变形量。

(3) 提高工件定位基准面的精度和减小它的表面粗糙度值。

工件的定位基准面一般总是承受夹紧力和切削力。如果定位基准面的尺寸误差、形状误差较大，表面粗糙度值较大，就会产生较大的接触变形。如在外圆磨床上磨轴，若轴的中心孔加工质量不高，不仅影响定位精度，而且还会引起较大的接触变形。

3) 采用合理的装夹和加工方式

例如，在卧式铣床上铣削角铁形零件，如按图 2.38(a)所示装夹、加工方式，工件的刚度较低，如改用图 2.38(b)所示装夹、加工方式，则刚度可大大提高。再如加工细长轴时，如改为反向进给(从主轴箱向尾座方向进给)，使工件从原来的轴向受压变为轴向受拉，也可提高工件刚度。



(a) 刚度较低的装夹方式　　(b) 刚度较高的装夹方式

图 2.38　铣角铁形零件的两种装夹方式

此外，增加辅助支承也是提高构件刚度的常用方法。例如，加工细长轴时采用中心架或跟刀架就是一个很典型的实例。

2. 减小载荷及其变化

采取适当的工艺措施如合理选择刀具几何参数以减少切削力，就可以减少受力变形。将毛坯分组，使一次调整中加工的毛坯余量比较均匀，就能减少切削力的变化，减少复映误差。

2.4.6　工件残余应力引起的变形

残余应力也称内应力，是指在没有外力作用下或去除外力后工件内存留的应力。

具有残余应力的零件处于一种不稳定的状态，它内部的组织有强烈的倾向要恢复到一个稳定的没有应力的状态，即使在常温下，零件也会不断地进行这种变化，直到残余应力完全消失为止。在这一过程中，零件的形状逐渐变化，原有的加工精度逐渐丧失，若把具

有残余应力的重要零件装配成产品，在使用中会产生变形，影响整台产品的质量。

特别提示

残余应力是由于金属内部相邻组织发生了不均匀的体积变化而产生的。促成这种变化的因素主要来自冷、热加工。

1．毛坯制造和热处理过程中产生的残余应力

在铸、锻、焊、热处理等加工过程中，由于各部分冷热收缩不均匀以及金相组织转变的体积变化，使毛坯内部产生了相当大的残余力。具有残余应力的毛坯由于残余应力暂时处于相对平衡的状态，在短时间内还看不出有什么变化。但加工时某些表面被切去一层金属后，就打破了这种平衡，残余应力将重新分布，零件就明显地出现了变形。

图 2.39 所示为一内外厚薄相差较大的铸件在铸造过程中产生残余应力的情况。铸件浇铸后，由于壁 A 和 C 比较薄，散热容易，所以冷却速度较 B 快。

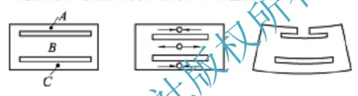
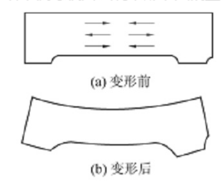


图 2.39　铸件残余应力的形成及变形

当 A、C 从塑性状态冷却到了弹性状态时(约 620℃)，B 尚处于塑性状态。此时，A、C 继续收缩，B 不起阻止变形的作用，故不会产生残余应力。当 B 也冷却到了弹性状态时，A、C 的温度已降低很多，其收缩速度变得很慢，但这时 B 收缩较快，因而受到 A、C 的阻碍。这时，B 内就产生了拉应力，而 A、C 内就产生了压应力，形成相互平衡的状态。如果在 A 上开一缺口，A 上的压应力消失，铸件在 B、C 的残余应力作用下，B 收缩，C 伸长，铸件就产生了弯曲变形，直至残余应力重新分布达到新的平衡状态为止。

推广到一般情况，各种铸件都难免发生冷却不均匀而产生残余应力。如铸造后的机床床身，其导轨面和冷却快的地方都会出现压应力。带有压应力的导轨表面在粗加工中被切去一层后，残余应力就重现发布，结果使导轨面出现中部下凹的直线度误差，如图 2.40 所示。



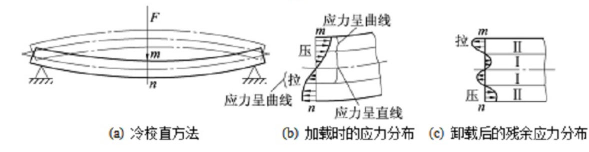
(a) 变形前

(b) 变形后

图 2.40　床身内应力引起的变形

2．冷校直带来的残余应力

冷校直是在常温下将已有变形的零件，在变形的相反方向加力，使工件反向弯曲，产生塑性变形，以达到校直的目的，如图2.41(a)所示。



(a) 冷校直方法　(b) 加载时的应力分布　(c) 卸载后的残余应力分布

图2.41　冷校直引起的残余应力

当工件外层应力超过屈服强度时，其内层应力还未超过弹性极限，故其应力分布情况如图2.41(b)所示。去除外力后，由于下部外层已产生拉伸的塑性变形，上部外层已产生压缩的塑性变形，故里层的弹性恢复受到阻碍。结果上部外层产生残余拉应力，上部里层产生残余压应力；下部外层产生残余压应力，下部里层产生残余拉应力，如图2.41(c)所示。冷校直后工件虽然减少了弯曲，但内部组织处于不稳定状态，如再进行加工，又会产生新的弯曲，故重要、精密的零件不允许进行冷校直。

3．切削加工带来的残余应力

切削过程中产生的力和热，也会使加工工件的表面层产生残余应力。

要减少残余应力，一般采取下列措施。

(1) 增加消除内应力的热处理工序。例如，对铸、锻、焊接件进行退火或回火；零件淬火后进行回火；对精度要求高的零件如床身、丝杠、箱体、精密主轴等在粗加工后进行时效处理来消除残余应力，常用人工时效、振动时效和天然时效等方法。

(2) 合理安排工艺过程。例如，粗精加工分开在不同工序中进行，使粗加工后有一定时间让残余应力重新分布，以减少对精加工的影响。在加工大型工件时，粗精加工往往在一个工序中完成，这时应在粗加工后松开工件，让工件有自由变形的可能，然后用较小的夹紧力夹紧工件进行精加工。对于精密零件(如精密丝杠)，在加工过程中不允许进行冷校直(可采用热校直)。

(3) 改善零件结构、提高零件的刚性、使壁厚均匀等，均可减少残余应力的产生。

2.5　工艺系统受热变形对加工精度的影响及其控制

2.5.1　概述

在机械加工过程中，工艺系统在各种热源的影响下会产生很复杂的变形。把这种变形称为热变形。热变形将破坏刀具与工件的正确几何关系和运动关系，导致工件产生加工误差。

热变形对加工精度影响比较大，特别是在精密加工和大件加工中，热变形所引起的加工误差通常会占到加工总误差的40%～70%。

工艺系统热变形不仅影响加工精度，而且还影响加工效率。为了减少热变形对加工精度的影响，通常要预热机床以获得热平衡，或降低切削用量以减少切削热和摩擦热，或粗加工后停机以待热量散发后再进行精加工，或增加工序(使粗、精加工分开)等。

高精、高效、自动化加工技术的发展，使工艺系统热变形问题变得更加突出，成为现代机械加工技术发展必须研究的重要问题。工艺系统是一个复杂系统，有许多因素影响其热变形，因而控制和减少热变形对加工精度的影响往往比较复杂。目前，无论在理论上还是在实践上都有许多问题尚待解决研究。

1. 工艺系统的热源

热总是由高温处向低温处传递的，热的传递方式有3种，即导热传热、对流传热和辐射传热。

引起工艺系统变形的热源可分为内部热源和外部热源两大类。内部热源包括切削热、摩擦热和派生热源，以切削热和摩擦热为主，它们产生于工艺系统内部，其热量主要是以热传导的形式传递的。外部热源主要是指工艺系统外部的，以对流传热为主要形式的环境温度和各种辐射热(包括由阳光、照明、暖气设备等发出的辐射热)。

切削热是切削加工过程中最主要的热源，它对工件加工精度的影响最为直接。影响切削热传导的主要因素是工件、刀具、夹具、机床等材料的导热性能，以及周围介质的情况。通常，在车削加工中，切屑所带走的热量最多，可达50%～80%，传给工件的热量次之，约占30%，而传给刀具的热量则很少，一般不超过5%；对于铣削、刨削加工，传给工件的热量一般在总切削热的30%以下；对于钻削和卧式镗孔，因为有大量的切屑滞留在孔中，传给工件的热量就比车削时要高，如在钻孔加工中传给工件的热量往往超过50%；磨削时磨屑很小，带走的热量很少，约为4%，大部分热量传入工件，84%左右，致使磨削表面的温度高达800～1000°C，因此磨削热既影响工件的加工精度，又影响工件的表面质量。

工艺系统中的摩擦热，主要是由机床和液压系统中运动部件产生，如电动机、轴承、齿轮、丝杠副、导轨副、离合器、液压泵、阀等各运动部分产生的摩擦热。尽管摩擦热比切削热少，但摩擦热在工艺系统中是局部发热，会引起局部温升和变形，破坏了系统原有的几何精度，对加工精度也会带来严重影响。

外部热源的热辐射及周围环境温度对机床热变形的影响，有时也是不容忽视的。例如，在加工大型工件时，往往要昼夜连续加工，由于昼夜温度不同，引起工艺系统的热变形就不一样，从而影响了加工精度。又如，照明灯光、加热器等对机床的热辐射，往往是局部的，日光对机床的照射不仅是局部的，而且不同时间的辐射热量和照射位置也不同，因而会引起机床各部分不同的温升和变形，这在大型、精密加工时尤其不能忽视。

2. 工艺系统的热平衡和温度场概念

工艺系统在各种热源作用下，温度会逐渐升高，同时它们也通过各种传热方式向周围的介质散发热量。当工件、刀具和机床的温度达到某一数值时，单位时间内散发出的热量与热源传入的热量趋于相等，这时工艺系统就达到了热平衡状态。在热平衡状态下，工艺系统各部分的温度就保持在一相对固定的数值上，因而各部分的热变形也就相应地趋于稳定。

由于作用于工艺系统各组成部分的热源，其发热量、位置和作用时间各不相同，各部

分的热容量、散热条件也不一样，因此各部分的温升是不相同的。即使是同一物体，处于不同空间位置上的各点在不同时间其温度也是不等的。物体中各点温度的分布称为温度场。当物体未达到热平衡时，各点温度不仅是坐标位置的函数，也是时间的函数，这种温度场称为不稳态温度场。物体达到热平衡后，各点温度将不再随时间而变化，而只是其坐标位置的函数，这种温度场则称为稳态温度场。

2.5.2　工件热变形对加工精度的影响

在工艺系统中，机床热变形最为复杂，工件、刀具的热变形相对来说要简单一些。这主要是因为在加工过程中，影响机床热变形的热源较多，也较复杂，而对工件和刀具来说，热源比较简单。因此，工件和刀具的热变形常可用解析法进行估算和分析。

使工件产生热变形的热源，主要是切削热。对于精密零件，周围环境温度和局部受到日光等外部热源的辐射热也不容忽视。工件的热变形可以归纳为两种情况来分析。

1. 工件比较均匀地受热

一些形状较简单的轴类、套类、盘类零件的内外圆加工时，切削热比较均匀地传入工件，如不考虑工件温升后的散热，其温度沿工件全长和圆周的分布都是比较均匀的，可近似地看成均匀受热，因此，其热变形可以按物理学计算热膨胀的公式求出。

加工盘类和长度较短的销轴、套类零件时，由于走刀行程很短，可以忽略在沿工件轴向位置上切削时间(即加热时间)先后的影响，因此引起的工件纵向误差可以忽略。车削较长工件时，由于在沿工件轴向位置上切削时间有先有后，开始切削时工件温升近于零，随着切削的进行，温升逐渐增加，加工直径随之逐渐胀大，至走刀终了时工件直径胀大最多，因而车刀的背吃刀量将随走刀而逐渐增大，工件冷却后外圆表面就会产生圆柱度误差。

车镗轴套类零件圆柱面，长度及径向受热变形。若在受热时测量达到规定尺寸，冷却后尺寸变小，可能出现尺寸超差。

为了避免工件粗加工时热变形对精加工时加工精度的影响，在安排工艺过程时应尽可能把粗、精加工分开在两个工序中进行，以使工件粗加工后有足够的冷却时间。

2. 工件不均匀地受热

铣、刨、磨平面时，除在沿进给方向有温度差外，更重要的是在工件只是在单面受到切削热的作用，上下表面间的温度差将导致工件向上拱起，加工时中间凸起部分被切去，冷却后工件变成下凹，造成误差。

2.5.3　刀具热变形对加工精度的影响

刀具热变形主要是由切削热引起的。通常传入刀具的热量并不太多，但由于热量集中在切削部分，以及刀体小，热容量小，故仍会有很高的温升。例如，车削时，高速钢车刀的工作表面温度可达700～8000℃，而硬质合金刀刃可达10000℃以上。

连续切削时，刀具的热变形在切削初始阶段增加很快，随后变得较缓慢，经过不长的时间后(约10～20min)便趋于热平衡状态。此后，热变形变化量就非常小，如图2.42所示。刀具总的热变形量可达0.03～0.05mm。

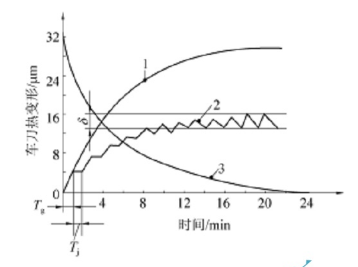


图 2.42 车刀热变形

1—连续切削 2—间断切削 3—冷却曲线

T_g—切削时间 T_j—间断时间

间断切削时，由于刀具有短暂的冷却时间，故其热变形曲线具有热胀冷缩双重特性，且总的变形量比连续切削时要小一些，最后趋于稳定在 δ 范围内变动。

当切削停止后，刀具温度立即下降，开始冷却较快，以后逐渐减慢。

加工大型零件，刀具热变形往往造成几何形状误差。如车长轴时，可能由于刀具热伸长而产生锥度(尾座处的直径比主轴箱附近的直径大)。

为了减少刀具的热变形，应合理选择切削用量和刀具几何参数，并给以充分冷却和润滑，以减少切削热，降低切削温度。

2.5.4 机床热变形对加工精度的影响

机床在工作过程中，受到内外热源的影响，各部分的温度将逐渐升高。由于各部件的热源不同，分布不均匀，以及机床结构的复杂性，因此不仅各部件的温升不同。而且同一部件不同位置的温升量也不相同，形成不均匀的温度场，使机床各部件之间的相互位置发生变化，破坏了机床原有的几何精度而造成加工误差。

机床空运转时，各运动部件产生的摩擦热基本不变。运转一段时间之后，各部件传入的热量和散失的热量基本相等，即达到热平衡状态，变形趋于稳定。机床达到热平衡状态时的几何精度称为热态几何精度。在机床达到热平衡状态之前，机床几何精度变化不定，对加工精度的影响也变化不定。因此，精密加工应在机床处于热平衡之后进行。

对于磨床和其他精密机床，除受室温变化等影响之外，引起其热变形的热量主要是机床空运转时的摩擦发热，而切削热影响较小。因此，机床空运转达到热平衡的时间及其所达到的热态几何精度是衡量精加工机床质量的重要指标。而在分析机床热变形对加工精度的影响时，也应首先注意其温度场是否稳定。

机床各部件由于体积都比较大，热容量大，因此其温升一般不大。如车床主轴箱温升一般不大于 60℃，磨床温升一般不大于 15～25℃，车床床身与主轴箱接合处的温升一般不大于 20℃，磨床床身的温升一般在 10℃以下。其他精密机床部件的温升还要低得多。机床

各部件结构与尺寸体积差异较大，各部分达到热平衡的时间也不相同，热容量大的部件达到热平衡的时间就长。

一般机床，如车床、磨床等，其空运转的热平衡时间为 4～6h，中小型精密机床为 1～2h，大型精密机床往往要超过 12h。

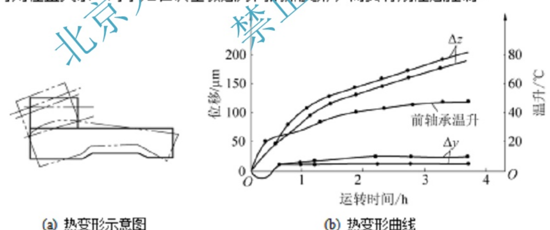
机床类型不同，其内部主要热源也各不相同，热变形对加工精度的影响也不相同。

车、铣、钻、镗类机床，主轴箱中的齿轮、轴承摩擦发热，润滑油发热是其主要热源，使主轴箱及与之相联部分如床身或立柱的温度升高而产生较大变形。例如，车床主轴发热使主轴箱在垂直面内和水平面内发生偏移和倾斜，如图 2.43(a)所示。在垂直平面内，主轴箱的温升将使主轴升高；又因主轴前轴承的发热量大于后轴承的发热量，主轴前端将比后端高。此外，由于主轴箱的热量传给床身，床身导轨将向上凸起，故而加剧了主轴的倾斜。对卧式车床热变形试验结果表明，影响主轴倾斜的主要因素是床身变形，它约占总倾斜量的 75%，主轴前后轴承温度差所引起的倾斜量只占 25%。

车床主轴温升、位移随运转时间变化的测量结果(图 2.43(b))表明，主轴在水平方向不同测量点的位移 Δy 为 10 μm 左右，而垂直方向不同测量点的位移 Δz 约为 150～200 μm 。虽然 Δz 较大，但在非误差敏感方向，对加工精度影响较小，而 Δy 是在误差敏感方向，因而对加工精度影响较大。

对于不仅在水平方向上装有刀具，在垂直方向和其他方向上也都可能装有刀具的自动车床、转塔车床，其主轴热位移，无论在垂直方向还是在水平方向，都会造成较大的加工误差。

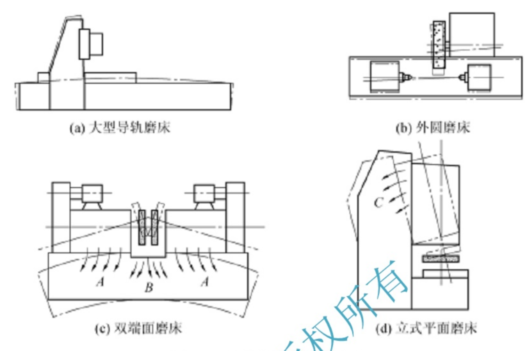
因此在分析机床热变形对加工精度影响时，还应注意分析热位移方向与误差敏感方向的相对角位置关系。对于处在误差敏感方向的热变形，需要特别注意控制。



(a) 热变形示意图　　(b) 热变形曲线

图 2.43　车床的热变形

龙门刨床、导轨磨床等大型机床，它们的床身较长，如导轨面与底面间稍有温差，就会产生较大的弯曲变形，故床身热变形是影响加工精度的主要因素。几种类型的机床热变形如图 2.44 所示。床身上下表面产生温差的原因，不仅是由于工作台运动时导轨面摩擦发热所致，环境温度的影响也是重要原因。例如，在夏天，地面温度一般低于车间室温，因此床身中凸，如图 2.44(a)所示。



(a) 大型导轨磨床　(b) 外圆磨床
(c) 双端面磨床　(d) 立式平面磨床

图 2.44　几种类型的机床热变形

各种磨床通常都有液压传动系统和高速回转磨头，并且使用大量的切削液，它们都是磨床的主要热源。砂轮主轴轴承的发热，将使主轴轴线升高并使砂轮架向工件方向趋近。由于主轴前后轴承温升不同，主轴侧母线还会出现倾斜。液压系统的发热使床身各处温升不同，导致床身的弯曲和前倾。

在热变形的影响下，外圆磨床的砂轮轴线与工件轴线之间的距离会发生变化(图 2.44(b))，并可能产生平行度误差。

平面磨床床身的热变形则受油池安放位置及导轨摩擦发热的影响。有些磨床利用床身作油池，因此床身下部温度高于上部，结果导轨产生中凹变形。有些磨床把油箱移到机外，由于导轨面的摩擦热，使床身的上部温度高于下部，因此导轨就会产生中凸变形。

双端面磨床的切削液喷向床身中部的顶面，使其局部受热而产生中凸变形，从而使两砂轮的端面产生倾斜，如图 2.44(c)所示。

立式平面磨床主轴承和主电动机的发热传到立柱，使立柱里侧的温度高于外侧，因而引起立柱的弯曲变形，造成砂轮主轴与工作台间产生垂直度误差(图 2.44(d))。

2.5.5　减少工艺系统热变形对加工精度影响的措施

1. 减少热源的发热和隔离热源

工艺系统的热变形对粗加工加工精度的影响一般可不考虑，而精加工主要是为了保证零件加工精度，工艺系统热变形的影响不能忽视。为了减小切削热，宜采用较小的切削用量。如果粗精加工在一个工序内完成，粗加工的热变形将影响精加工的精度。一般可以在粗加工后停机一段时间使工艺系统冷却，同时还应将工件松开，待精加工时再夹紧。这样就可减少粗加工热变形对精加工精度的影响。当零件精度要求较高时，则以粗精加工分开为宜。

为了减少机床的热变形，凡是可能从机床分离出去的热源，如电动机、变速箱、液压

系统、冷却系统等均应移出，使之成为独立单元。对于不能分离的热源，如主轴轴承、丝杠螺母副、高速运动的导轨副等则可以从结构、润滑等方面改善其摩擦特性，减少发热，如采用静压轴承、静压导轨，改用低黏度润滑油、锂基润滑脂，或使用循环冷却润滑、油雾润滑等；也可用隔热材料将发热部件和机床大件(如床身、立柱等)隔离开来。

对发热量大的热源，如果既不能从机床内部移出，又不便隔热，则可采用强制式的风冷、水冷等散热措施。目前，大型数控机床、加工中心机床普遍采用冷冻机对润滑油、切削液进行强制冷却，以提高冷却效果。精密丝杠磨床的母丝杠中则通以冷却液，以减少热变形。

2．均衡温度场

图 2.45 所示为 M7150A 型磨床所采用的均衡温度场措施的示意图。该机床床身较长，加工时工作台纵向运动速度较高，所以床身上部温升高于下部。为均衡温度场所采取的措施是：将油池搬出主机做成一单独油箱；在床身下部配置热补偿油沟，使一部分带有余热的回油经热补偿油沟后送回油池。采取这些措施后，床身上、下部温差降至 1～2℃，导轨的中凸量由原来的 0.0265mm 降至 0.0052mm。

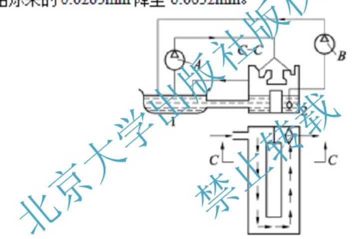


图 2.45　M7150A 型磨床的热补偿油沟

A、*B*—油泵　1—油箱　2—热补偿油沟

图 2.46 所示的立式平面磨床采用热空气加热温度较低的立柱后壁，以均衡立柱前后壁的温升，减少立柱的向后倾斜。图中热空气从电动机风扇排出，通过特设的软管引向立柱的后壁空间。采取这种措施后，磨削平面的平面度误差可降到未采取措施前的 1/3～1/4。

3．采用合理的机床部件结构及装配基准

1) 采用热对称结构

在变速箱中，将轴、轴承、传动齿轮等对称布置，可使箱壁温升均匀，箱体变形减小。

2) 合理选择机床零部件的装配基准

图 2.47 表示了车床主轴箱在床身上的两种不同定位方式。由于主轴部件是车床主轴箱的主要热源，故在图 2.47(a)中，主轴轴心线相对于装配基准 H 而言，主要在 z 方向产生热位移，对加工精度影响较小。而在图 2.47(b)中，方向 y 的受热变形直接影响刀具与工件的法向相对位置，故造成的加工误差较大。

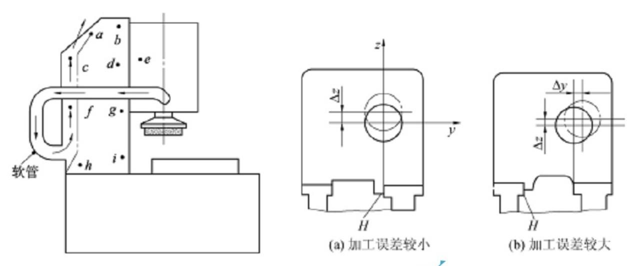


图 2.46　均衡立柱前后壁的温度场　　图 2.47　车床主轴箱定位面位置对热变形的影响

4．加速达到热平衡状态

对于精密机床特别是大型机床，达到热平衡的时间较长。为了缩短这个时间，可以在加工前，使机床作高速空运转，或在机床的适当部位设置控制热源，人为地给机床加热，使机床较快地达到热平衡状态，然后进行加工。

5．控制环境温度

精密机床应安装在恒温车间，其恒温精度一般控制在±1℃以内，精密级为±0.5℃。恒温室平均温度一般为 20℃，冬季可取 17℃，夏季取 23℃。

2.6　加工误差的统计分析

以上几节介绍的都属于单因素分析法。在生产实际中，影响加工精度的因素往往是错综复杂的，有时很难用单因素分析法来分析计算某一工序的加工误差，这时就必须通过对生产现场中实际加工出的一批工件进行检查测量，运用数理统计的方法加以处理和分析，从中发现误差的规律，指导大家找出解决加工精度的途径，这就是加工误差的统计分析法。

2.6.1　分布图分析法

1．实验分布图

成批加工某种零件，抽取其中一定数量进行测量，抽取的这批零件称为样本，其件数 n 称为样本容量。

由于存在各种误差的影响，加工尺寸或偏差总是在一定范围内变动(称为尺寸分散)，即随机变量，用 x 表示。样本尺寸或偏差的最大值 x_{max} 与最小值 x_{min} 之差，称为极差 R，即

$$R = x_{max} - x_{min} \tag{2-10}$$

将样本尺寸或偏差按大小顺序排列，并将它们分成 k 组，组距为 d 。d 可按下式计算：

$$d = \frac{R}{k-1} \tag{2-11}$$

同一尺寸或同一误差组的零件数量 m_i 称为频数。频数与样本容量之比称为频率 f_i，即

$$f_i = \frac{m_i}{n} \tag{2-12}$$

以工件尺寸(或误差)为横坐标，以频数或频率为纵坐标，就可以作出该批工件加工尺寸(或误差)的实验分布图，即直方图。

选择组数 k 和组距 d，对实验分布图的显示好坏有很大关系。组数过多，组距太小，分布图会被频数的随机波动歪曲；组数太少，组距太大，分布特征将被掩盖。k 值一般应根据样本容量来选择，见表 2-1。

表 2-1　分组数 k 的选定

n	25～40	40～60	60～100	100	100～160	160～250
k	6	7	8	10	11	12

为了分析该工序的加工精度情况，可在直方图上标出该工序的加工公差带位置，并计算出该样本的统计数字特征：平均值 $\bar{x}$ 和标准差 S。

样本的平均值 $\bar{x}$ 表示该样本的尺寸分散中心。它主要决定于调整尺寸的大小和常值系统误差。样本的平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2-13}$$

式中　x_i ——各工件的尺寸。

样本的标准差 S 反映了该批工件的尺寸分散程度。它是由变值系统误差和随机误差决定的，误差大 S 也大，误差小 S 也小。

样本的标准差：

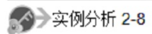
$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{2-14}$$

当样本的容量比较大时，为简化计算，可直接用 n 来代替上式中的 $(n-1)$。

为了使分布图能代表该工序的加工精度，不受组距和样本容量的影响，纵坐标应改用频率密度。

$$频率密度 = \frac{频率}{组距} = \frac{频数}{样本容量 \times 组距} \tag{2-15}$$

下面通过一实例来说明直方图的绘制步骤。



实例分析 2-8

例：磨削一批轴径 $\phi 60^{+0.06}_{+0.01}$ mm 的工件，轴颈尺寸实测值见表 2-2，绘制工件加工尺寸的直方图。

表 2-2 轴颈尺寸实测值(μm)

44	20	46	32	20	40	52	33	40	25	43	38	40	41	30	36	49	51	38	34
22	46	38	30	42	38	27	49	45	45	38	32	45	48	28	36	52	32	42	38
40	42	38	52	38	36	37	43	28	45	36	50	46	33	30	40	44	34	42	47
22	28	34	30	36	32	35	22	40	35	36	42	46	42	50	40	36	20	16	53
32	46	20	28	46	28	54	18	32	33	26	45	47	36	38	30	49	18	38	38

说明：表中数据为实测尺寸与基本尺寸之差。

解：(1)收集数据。

在从总体中抽取样本时，确定样本的容量很重要。若样本容量太小，则样本不能准确反映总体的实际分布，就失去了抽取样本的本来目的；若样本容量太大，则又增加了分析计算的工作量。通常取样本容量 n=50～200。

本例取 n=100 件，实测数据见表 2-2。找出最大值 x_{max} =54μm，最小值 x_{min} =16μm。

(2) 确定分组数 k、组距 d、各组组界和组中值。组数按表 2-1 选取，K=9。

组距：$d=\dfrac{R}{k-1}=\dfrac{x_{max}-x_{min}}{k-1}=\left(\dfrac{54-16}{8}\right)\mu m=4.75\mu m$

取 $d=5\mu m$

各组组界为：$x_{min}+(j-1)d\pm\dfrac{d}{2}$ $(j=1,2,3,\cdots,k)$

例如：第一组下界值为：$x_{min}-\dfrac{d}{2}=\left(16-\dfrac{5}{2}\right)\mu m=13.5\mu m$，第一组上界值为：$x_{min}+\dfrac{d}{2}=\left(16+\dfrac{5}{2}\right)\mu m=18.5\mu m$，其余类推。

各组组中值为：$x_{min}+(j-1)d$。

例如，第一组组中值为：$x_{min}+(1-1)d=16\mu m$。

(3) 记录各组数据，整理成频数分布表(见表 2-3)。

表 2-3 频数分布表

组号	组界/μm	中心值 x_i	频数	频率/(%)	频率密度/[μm^{-1}(%)]
1	13.5～18.5	16	3	3	0.6
2	18.5～23.5	21	7	7	1.4
3	23.5～28.5	26	8	8	1.6
4	28.5～33.5	31	13	13	2.6
5	33.5～38.5	36	26	26	5.2
6	38.5～43.5	41	16	16	3.2
7	43.5～48.5	46	16	16	3.2
8	48.5～53.5	51	10	10	2
9	53.5～58.5	56	1	1	0.2

(4) 根据表 2-3 中数据画出直方如图 2.48 所示。

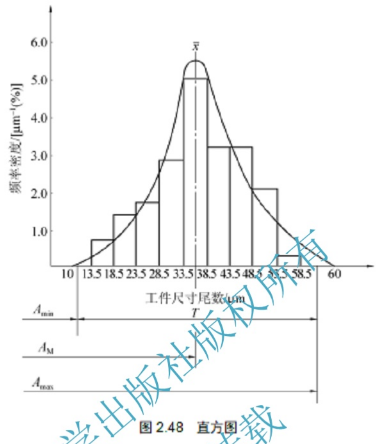


图 2.48　直方图

(5) 在直方图上作出最大极限尺寸 A_{max}=60.06mm 及最小极限尺寸 A_{min}=60.01mm 的标志线，并计算 $\bar{x}$ 和 S，可得：

$$\bar{x}=37.3\mu m \qquad S=8.93\mu m$$

由直方图可以直观地看到工件尺寸或误差的分布情况：该批工件的尺寸有一分散范围，尺寸偏大、偏小者很少，大多数居中；尺寸分散范围(6S=53.58 μm)略大于公差值(T=50 μm)，说明本工序的加工精度稍显不足；分散中心 $\bar{x}$ 与公差带中心 A_M 基本重合，表明机床调整误差(常值系统误差)很小。

欲进一步研究该工序的加工精度问题，必须找出频率密度与加工尺寸间的关系，因此必须研究理论分布曲线。

2．理论分布曲线

1) 正态分布

概率论已经证明，相互独立的大量微小随机变量，其总和的分布是符合正态分布的。在机械加工中，用调整法加工一批零件，其尺寸误差是由很多相互独立的随机误差综合作用的结果，如果其中没有一个是起决定作用的随机误差，则加工后零件的尺寸将近似于正态分布。

正态分布曲线的形状如图 2.49 所示。其概率密度函数表达式为：

$$y=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (-\infty<x<+\infty,\ \sigma>0) \tag{2-16}$$

式中　y——分布的概率密度；

x——随机变量；

μ——正态分布随机变量总体的算术平均值；

σ——正态分布随机变量的标准差。

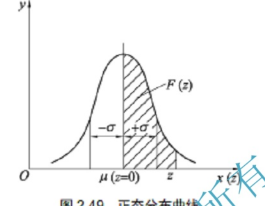


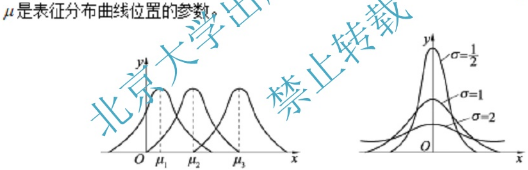
图 2.49　正态分布曲线

由公式和图可以看出，当 $x=\mu$ 时，

$$y_{\max}=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \tag{2-17}$$

这是曲线的最大值，在它左右的曲线是对称的。

如果改变 μ 值，分布曲线将沿横坐标移动而不改变其形状，如图 2.50(a)所示，这说明 μ 是表征分布曲线位置的参数。



(a) 改变 μ 值的分布情况　　(b) 改变 σ 值的分布情况

图 2.50　μ、σ 值对正态分布曲线的影响

从公式(2-17)可以看出，分布曲线的最大值 $y_{\max}$ 与 σ 成反比。所以当 σ 减少时，分布曲线将向上伸展。由于分布曲线所围成的面积总是保持等于 1，因此 σ 越小，分布曲线两侧越向中间收紧。反之，当 σ 增大时，$y_{\max}$ 减小，分布曲线越平坦地沿横轴伸展，如图 2.50(b)所示。可见 σ 是表征分布曲线形状的参数，即它刻画了随机变量 x 取值的分散程度。

总体平均值 $\mu=0$，总体标准差 $\sigma=1$ 的正态分布称为标准正态分布。任何不同的 μ 与 σ 的正态分布都可以通过坐标变换 $z=\frac{x-\mu}{\sigma}$，变为标准正态分布，故可以利用标准正态分布的函数值，求得各种正态分布的函数值。

由分布函数的定义可知，正态分布函数是正态分布概率密度函数的积分：

$$F(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{2}}\mathrm{d}x \tag{2-18}$$

由式(2-18)可知，$F(x)$为正态分布曲线上下积分限间包含的面积，它表征了随机变量x落在区间$(-\infty, x)$上的概率。令$z=\frac{x-\mu}{\sigma}$，则有

$$F(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}}dz \tag{2-19}$$

$F(z)$为图 2.49 中有阴影部分的面积。对于不同的z值得$F(z)$，可由表 2-4 查出。

当$z=\pm3$时，即$x-\mu=\pm3\sigma$，由表 2-4 查得$2F(3)=0.49865\times2=99.73\%$。这说明随机变量$x$落在$\pm3\sigma$范围以内的概率为 99.73%，落在此范围以外的概率仅为 0.27%，此值很小。因此可以认为正态分布的随机变量的分散范围是$\pm3\sigma$。这就是所谓的$\pm3\sigma$原则。

$\pm3\sigma$的概念，在研究加工误差时应用很广，是一个重要的概念。6σ的大小代表了某种加工方法在一定条件下(如毛坯余量、切削用量、正常的机床、夹具、刀具等)所能达到的加工精度。所以在一般情况下，应使所选择的加工方法的标准差σ与公差带宽度T之间具有下列关系：

$$6\sigma \leqslant T \tag{2-20}$$

正态分布总体的μ和σ通常是不知道的，但可以通过它的样本平均值$\bar{x}$和样本标准差S来估算。这样，成批加工一批工件，抽检其中的一部分，即可判断整批工件的加工精度。

2) 非正态分布

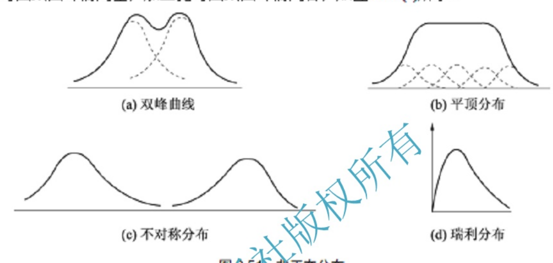
工件的实际分布，有时并不近似于正态分布。例如，将两次调整下加工的工件混在一起，由于每次调整时常值系统误差是不同的，如常值系统误差之值大于2.2σ，就会得到双峰曲线，如图 2.51(a)所示；假如把两台机床加工的工件混在一起，不仅调整时常值系统误差不等，机床精度也不同(随机误差的影响也不同，即σ不同)，那么曲线的两个高峰也不一样。

表 2-4 $F(z)$的值

Z	F(z)	Z	F(z)	Z	F(z)	Z	F(z)	Z	F(z)
0.00	0.0000	0.20	0.0793	0.60	0.2257	1.00	0.3413	2.00	0.4772
0.01	0.0040	0.22	0.0871	0.62	0.2324	1.05	0.3531	2.10	0.4821
0.02	0.0080	0.24	0.0948	0.64	0.2389	1.10	0.3643	2.20	0.4861
0.03	0.0120	0.26	0.1023	0.66	0.2454	1.15	0.3749	2.30	0.4893
0.04	0.0160	0.28	0.1103	0.68	0.2517	1.20	0.3849	2.40	0.4918
0.05	0.0199	0.30	0.1179	0.70	0.2580	1.25	0.3944	2.50	0.4938
0.06	0.0239	0.32	0.1255	0.72	0.2642	1.30	0.4032	2.60	0.4953
0.07	0.0279	0.34	0.1331	0.74	0.2703	1.35	0.4115	2.70	0.4965
0.08	0.0319	0.36	0.1406	0.76	0.2764	1.40	0.4192	2.80	0.4974
0.09	0.0359	0.38	0.1480	0.78	0.2823	1.45	0.4265	2.90	0.4981
0.10	0.0398	0.40	0.1554	0.80	0.2881	1.50	0.4332	3.00	0.49865
0.11	0.0438	0.42	0.1628	0.82	0.2039	1.55	0.4394	3.20	0.49931
0.12	0.0478	0.44	0.1700	0.84	0.2995	1.60	0.4452	3.40	0.49966
0.13	0.0517	0.46	0.1772	0.86	0.3051	1.65	0.4505	3.60	0.499841
0.14	0.0557	0.48	0.1814	0.88	0.3106	1.70	0.4554	3.80	0.499928
0.15	0.0596	0.50	0.1915	0.90	0.3159	1.75	0.4599	4.00	0.499968
0.16	0.0636	0.52	0.1985	0.92	0.3212	1.80	0.4641	4.50	0.499997
0.17	0.0675	0.54	0.2004	0.94	0.3264	1.85	0.4678	5.00	0.49999997
0.18	0.0714	0.56	0.2123	0.96	0.3315	1.90	0.4713	—	—
0.19	0.0753	0.58	0.2190	0.98	0.3365	1.95	0.4744	—	—

如果加工中刀具或砂轮的尺寸磨损比较显著，所得一批工件的尺寸分布如图 2.51(b)所示。尽管在加工的每一瞬间，工件的尺寸呈正态分布，但是随着刀具或砂轮的磨损，不同瞬间尺寸分布的算术平均值是逐渐移动的(当均匀磨损时，瞬时平均值可看成是匀速移动)，因此分布曲线为平顶。

当工艺系统存在显著的热变形时，分布曲线往往不对称，例如，刀具热变形严重，加工轴时曲线凸峰偏向左，加工孔时曲线凸峰偏向右，如图 2.51(c)所示。



(a) 双峰曲线　(b) 平顶分布

(c) 不对称分布　(d) 瑞利分布

图 2.51　非正态分布

用试切法加工时，操作者主观上存在着宁可翻修也不可报废的倾向性，所以分布图也会出现不对称情况：加工轴时宁大勿小，故凸峰偏向右；加工孔时宁小勿大，故凸峰偏向左。

对于端面圆跳动和径向圆跳动一类的误差，一般不考虑正负号，所以接近零的误差值较多，远离零的误差值较少，其分布(称为瑞利分布)也是不对称的，如图 2.51(d)所示。

对于非正态分布的分散范围，就不能认为是 6σ，而必须除以相对分布系数 k，即非正态分布的分散范围：

$$T = 6\sigma / k \tag{2-21}$$

k 值的大小与分布图形状有关，具体数值可见表 2-5。表中的 e 为相对不对称系数，它是总体算术平均值坐标点与总体分散范围中心的距离与一半分散范围($T/2$)之比值。因此分布中心偏移量 Δ 为：

$$\Delta = eT / 2 \tag{2-22}$$

表 2-5　不同分布曲线的 e、k 值

分布特征	正态分布	三角分布	均匀分布	瑞利分布	偏态分布	
					外尺寸	内尺寸
分布曲线	-3σ　3σ			$\frac{eT}{2}$	$\frac{eT}{2}$	$\frac{eT}{2}$
e	0	0	0	−0.28	0.26	−0.26
k	1	1.22	1.73	1.14	1.17	1.17

3. 分布图分析法的应用

1) 判别加工误差性质

如前所述，假如加工过程中没有变值系统误差，那么其尺寸分布应服从正态分布，这是判别加工误差性质的基本方法。

如果实际分布与正态分布基本相符，加工过程中没有变值系统误差(或影响很小)，这时就可进一步根据平均值$\bar{x}$是否与公差带中心重合来判断是否存在常值系统误差($\bar{x}$与公差带中心不重合就说明存在常值系统误差)。常值系统误差仅影响$\bar{x}$值，即只影响分布曲线的位置，对分布曲线的形状没有影响。

如实际分布与正态分布有较大出入，可根据直方图初步判断变值系统误差的性质。

2) 确定工序能力及其等级

所谓工序能力是指工序处于稳定状态时，加工误差正常波动的幅度。当加工尺寸服从正态分布时，其尺寸分散范围是6σ，所以工序能力就是6σ。

工序能力等级是以工序能力系数来表示的，它代表了工序能满足加工精度要求的程度。当工序处于稳定状态时，工序能力系数C_p按下式计算：

$$C_p = T/6\sigma$$

式中　T——工件尺寸公差。

根据工序能力系数C_p的大小，可将工序能力分为5级，见表2-6。

表2-6　工序能力等级

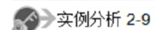
工序能力系数	工序等级	说　明
$C_p>1.67$	特级	工艺能力过高，可以允许有异常波动，不一定经济
$1.67\geqslant C_p>1.33$	一级	工艺能力足够，可以允许有一定的异常波动
$1.33\geqslant C_p>1.00$	二级	工艺能力勉强，必须密切注意
$1.00\geqslant C_p>0.67$	三级	工艺能力不足，可能出现少量不合格品
$0.67\text{I}\geqslant C_p$	四级	工艺能力很差，必须加以改进

一般情况下，工序能力不应低于二级，即$C_p>1$。

必须指出，$C_p>1$，只说明该工序的工序能力足够，加工中是否会出废品，还要看调整得是否正确。如加工中有常值系统误差，μ就与公差带中心位置A_M不重合，那么只有当$C_p>1$、且$T\geqslant 6\sigma+2|\mu-A_M|$时才不会出不合格品。如果$C_p<1$，那么不论怎么调整，不合格品总是不可避免的。

3) 估算合格品率或不合格品率

不合格品率包括废品率和可返修的不合格品率，它可通过分布曲线进行估算。



例：在无心磨床上磨削销轴外圆，要求外径$d=\phi12_{-0.043}^{-0.016}$mm，抽取一批零件，经实测后计算得到$\bar{x}=11.974$mm，$\sigma=0.005$mm，其尺寸分布符合正态分布，试分析该工序的加工质量。

解：(1)根据所计算的 $\bar{x}$ 和 6σ 作分布图，如图 2.52 所示。

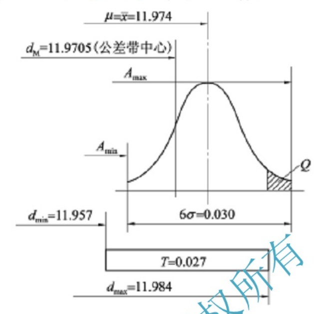


图 2.52　圆销直径尺寸分布图

(2) 计算工序能力系数 C_p。

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} = \frac{-0.016-(-0.043)}{6\times 0.005} = 0.9<1$$

工艺能力系数 C_p<1 表明该工序工序能力不足，产生不合格率是不可避免的。

(3) 计算不合格品率 Q。

工件要求最小尺寸 d_{min}=11.957mm，最大尺寸 d_{max}=11.984mm。

工件可能出现的极限尺寸为：

$A_{min} = \bar{x} - 3\sigma = (11.974 - 0.015)\text{mm} = 11.959\text{mm} > d_{min}$，故不会产生不可修复的废品。

$A_{max} = \bar{x} + 3\sigma = (11.974 + 0.015)\text{mm} = 11.989\text{mm} > d_{max}$，故将产生可修复的废品。

废品率 $Q=0.5-F(z)$

$$z = \frac{x-\bar{x}}{\sigma} = \frac{11.984-11.974}{0.005} = 2$$

查表 2-4，在 z=2 时，$F(z)$=0.4772

Q=0.5−0.4772=2.28%

(4) 改进措施。

重现调整机床，使分散中心 $\bar{x}$ 与公差带中心 d_M 重合，则可减少不合格品率。调整量 Δ=(11.974−11.9705)mm=0.0035mm(具体操作时，使砂轮向前进刀 $\Delta/2$ 的磨削深度即可)。

特别提示

分布图分析法的缺点在于：没有考虑一批工件加工的先后顺序，故不能反映误差变化的趋势，难以区别变值系统误差与随机误差的影响；必须等到一批工件加工完毕后才能绘制分布图，因此不能在加工过程中及时提供控制精度的信息。

分布图分析法特点。

(1) 采用大样本，较接近实际地反映工艺过程总体。

(2) 能将常值系统误差从误差中区分开。

(3) 在全部样本加工后绘出曲线，不能反映先后顺序，不能将变值系统误差从误差中区分开。

(4) 不能及时提供工艺过程精度的信息，事后分析。

(5) 计算复杂，只适合工艺过程稳定的场合。

采用下面介绍的点图法，可以弥补上述不足。

2.6.2 点图分析法

点图分析法计算简单，能及时提供主动控制信息，可用于稳定过程，也可用于不稳定过程。点图有多种形式，这里仅介绍单值点图和$\bar{x}-R$图两种。

用点图来评价工艺过程稳定性采用的是顺序样本，即样本是由工艺系统在一次调整中，按顺序加工的工件组成。这样的样本可以得到在时间上与工艺过程运行同步的有关信息，反映出加工误差随时间变化的趋势。而分布图分析法采用的是随机样本，不考虑加工顺序，而且是对加工好的一批工件有关数据处理后才能作出分布曲线。

1. 单值点图

如果按加工顺序逐个地测量一批工件的尺寸，以工件序号为横坐标，工件尺寸(或误差)为纵坐标，就可作出如图2.53(a)所示点图。为了缩短点图的长度，可将顺次加工出的几个工件编为一组，以工件组序为横坐标，而纵坐标保持不变，同一组内各工件可根据尺寸分别点在同一组号的垂直线上，就可以得到如图2.53(b)所示点图。

上述点图反映了每个工件尺寸(或误差)与加工时间的关系，故称为单值点图。

假如把点图的上下极限点包络成两根平滑的曲线，并作出这两根曲线的平均值曲线，如图2.53(c)所示，就能较清楚地揭示出加工过程中误差的性质及其变化趋势。平均值曲线$\overline{OO'}$表示每一瞬时的分散中心，其变化情况反映了变值系统误差随时间变化的规律，其起始点O则可看成常值系统误差的影响；上下限曲线AA'和BB'间的宽度表示每一瞬时的尺寸分散范围，也就是反映了随机误差的影响。

单值点图上画有上下两条控制界限线(图2.53中用实线表示)和两极限尺寸线(用虚线表示)，作为控制不合格品的参考界限。

2. $\bar{x}-R$图

1) 样组点图的基本形式及绘制

为了能直接反映出加工过程中系统误差和随机误差随加工时间的变化趋势，实际生产中常用样组点图来代替单值点图。样组点图的种类很多，目前使用得最广泛的是$\bar{x}-R$图。$\bar{x}-R$图是平均值$\bar{x}$控制图和极差R控制图联合使用时的统称。前者控制工艺过程质量指标的分布中心，后者控制工艺过程质量指标的分散程度。

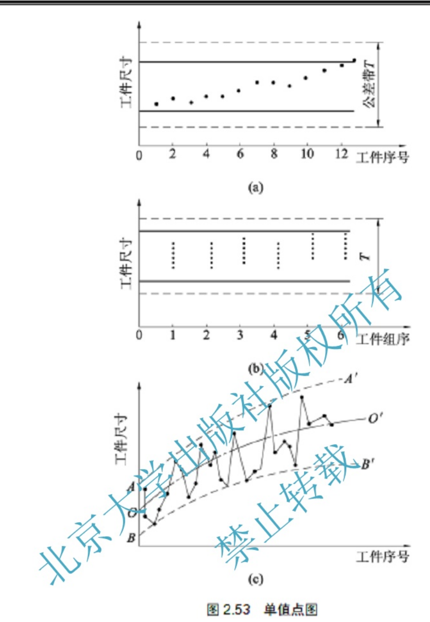


图 2.53　单值点图

$\bar{x}-R$ 图的横坐标是按时间先后采集的小样本的组序号，纵坐标为各小样本的平均值 $\bar{x}$ 和极差 R。在 $\bar{x}-R$ 图上各有 3 根线，即中心线和上、下控制线。

绘制 $\bar{x}-R$ 图是以小样本顺序随机抽样为基础的。在工艺过程进行中，每隔一定时间抽取容量 n=2～10 件的一个小样本，求出小样本的平均值 $\bar{x}$ 和极差 R。经过若干时间后，就可取得若干个(如 k 个，通常取 k=25)小样本，将各组小样本的 $\bar{x}$ 和 R 值分别点在 $\bar{x}-R$ 图上，即制成了 $\bar{x}-R$ 图。

2) $\bar{x}-R$ 图上、下控制线的确定

任何一批工件的加工尺寸都有波动性，因此各小样本的平均值 $\bar{x}$ 和极差 R 也都有波动性。要判别波动是否属于正常，就需要分析 $\bar{x}$ 和 R 的分布规律，在此基础上也就可以确定 $\bar{x}-R$ 图上、下控制线的位置。

由概率论可知，当总体是正态分布时，其样本的平均值 $\bar{x}$ 的分布也服从正态分布，且 $\bar{x}\sim N\left(\mu,\dfrac{\sigma^2}{n}\right)$($\mu$、$\sigma$ 是总体的均值和标准差)，因此 $\bar{x}$ 的分散范围是($\mu\pm 3\sigma/\sqrt{n}$)。

R的分布虽然不是正态分布，但当$n<10$时，其分布与正态分布也是比较接近的，因而R的分散范围也可取为$(\bar{R}\pm3\sigma_R)$($\bar{R}$、σ_R分别是R分布的均值和标准差)，而且$\sigma_R=d\sigma$。式中d为常数，其值可见表 2-7。

总体的均值μ和标准差σ通常是不知道的。但由数理统计可知，总体的平均值μ可以用小样本平均值$\bar{x}$的平均值$\bar{\bar{x}}$来估计，而总体的标准差σ可以用$a_n\bar{R}$来估计，即

$$\hat{\mu}=\bar{\bar{x}}\text{，}\quad \bar{\bar{x}}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\bar{x}_i\text{；}\quad \hat{\sigma}=a_n\bar{R}\text{，}\quad \bar{R}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}R_i$$

各式中　$\hat{\mu}$、$\hat{\sigma}$——分别表示μ、σ的估计值；

$\bar{x}_i$——各小样本的平均值；

R_i——各校样本的极差；

a_n——常数，其值见表 2-7。

表 2-7　d、a_n、A_2、D_1、D_2值

n	d	a_n	A_2	D_1	D_2
4	0.880	0.486	0.73	2.28	0
5	0.864	0.430	0.58	2.11	0
6	0.848	0.395	0.48	2.00	0

用样本极差R来估计总体的σ，其缺点是不如用样本的标准差S来得可靠，但由于其计算很简单，所以在生产中经常采用。

最后便可以确定$\bar{x}-R$图上的各条控制线。

(1) $\bar{x}$点图的各条控制线。

中线为　$\bar{\bar{x}}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\bar{x}_i$

上控制线为　$\bar{x}_s=\bar{\bar{x}}+A_2\bar{R}$

下控制线为　$\bar{x}_x=\bar{\bar{x}}-A_2\bar{R}$

式中，A_2为常数，$A_2=3a_n/\sqrt{n}$，见表 2-7。

(2) R点图的各线控制线。

中线为　$\bar{R}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}R_i$

上控制线为　$R_s=\bar{R}+3\sigma_R=(1+3da_n)\bar{R}=D_1\bar{R}$

下控制线为　$R_x=\bar{R}-3\sigma_R=(1-3da_n)\bar{R}=D_2\bar{R}$

式中，D_1、D_2为常数，见表 2-7。

在点图上作出中线和上下控制线后，就可根据图中点的情况来判别工艺过程是否稳定(波动状态是否属于正常)，判别的标志见表 2-8。

表 2-8　正常波动与异常波动标志

正常波动	异常波动
(1) 没有点子超出控制线 (2) 大部分点子在中线上下波动，小部分在控制线附近 (3) 点子没有明显的规律性	(1) 有点子超出控制线 (2) 点子密集在中线上下附近 (3) 点子密集在控制线附近 (4) 连续 7 点以上出现在中线一侧 (5) 连续 11 点中有 10 点出现在中线一侧 (6) 连续 14 点中有 12 点以上出现在中线一侧 (7) 连续 17 点中有 14 点以上出现在中线一侧 (8) 连续 20 点中有 16 点以上出现在中线一侧 (9) 点子有上升或下降倾向 (10) 点子有周期性波动

由上述可知，$\bar{x}$ 在一定程度上代表了瞬时的分散中心，故 $\bar{x}$ 点图主要反映系统误差及其变化趋势；R 在一定程度上代表了瞬时的尺寸分散范围，故 R 点图可反映出随机误差及其变化趋势。单独的 $\bar{x}$ 点图和 R 点图不能全面地反映加工误差的情况，因此这两种点图必须结合起来应用。

特别提示

根据点子分布情况及时查找原因采取措施：

(1) 若极差 R 未超控制线，说明加工中瞬时尺寸分布较稳定。

(2) 若均值有点超出控制线，甚至超出公差界限，说明存在某种占优势的系统误差，过程不稳定。若点图缓慢上升，可能是系统热变形；若点图缓慢下降，可能是刀具磨损。

(3) 采取措施消除系统误差后，随机误差成主要因素，分析其原因，控制尺寸分散范围。

特别提示

必须指出，工艺过程稳定性与出不出废品是两个不同的概念。工艺过程的稳定性用 $\bar{x}-R$ 图判断，而工件是否合格则用公差衡量。两者之间没有必然的联系。例如，某一工艺过程是稳定的，但误差较大，若用这样的工艺过程来制造精密零件，则肯定都是废品。客观存在的工艺过程与人为规定的零件公差之间如何正确地匹配，即是前面所介绍的工序能力系数的选择问题。

2.7　保证和提高加工精度的主要途径

为了保证和提高机械加工精度，必须找出造成加工误差的主要因素(原始误差)，然后采取相应的工艺技术措施来控制或减少这些因素的影响。

生产实际中尽管有许多减少误差的方法和措施，但从误差减少的技术上看，可将它们分成两大类。

1) 误差预防

指减少原始误差或减少原始误差的影响，即减少误差源或改变误差源至加工误差之间的数量转换关系。实践与分析表明，当加工精度要求高于某一程度后，利用误差预防技术

来提高加工精度所花费的成本将按指数规律增长。

2) 误差补偿

在现存的表现误差条件下，通过分析、测量，进而建立数学模型，并以这些信息为依据，人为地在系统中引入一个附加的误差源，使之与系统中现存的表现误差相抵消，以减少或消除零件的加工误差。在现有工艺系统条件下，误差补偿技术是一种有效而经济的方法，特别是借助微型计算机辅助技术，可达到很好的效果。

2.7.1 误差预防技术

1. 合理采用先进工艺与设备

这是保证加工精度的最基本方法。因此，在制订零件加工工艺规程时，应对零件每道加工工序的能力进行精确评价，并尽可能合理采用先进的工艺和设备，使每道工序都具备足够的工序能力。随着产品质量要求的不断提高，产品生产数量的增大和不合格率的降低，证明采用先进的加工工艺和设备，其经济效益是十分显著的。

2. 直接减少原始误差法

这也是在生产中应用较广的一种基本方法。它是在查明影响加工精度的主要原始误差因素之后，设法对其直接进行消除或减少。

如加工细长轴时易产生弯曲和振动(图 2.54(a))，增大主偏角减小背向力，使用跟刀架或中心架增加工件刚度。但在进给力作用下，会因"压杆失稳"而被压弯；在切削热的作用下，工件会变长，也将产生变形。

采取措施：采用反向进给的切削方法，使用弹性的尾座顶尖。如图 2.54(b)所示，进给方向由卡盘一端指向尾座，使 F_f 力对工件起拉伸作用，同时尾座改用可伸缩的弹性顶尖，就不会因 F_f 和热应力而压弯工件；采用大进给量和较大主偏角的车刀，增大 F_f 力，工件在强有力的拉伸作用下，具有抑制振动的作用，使切削平稳。

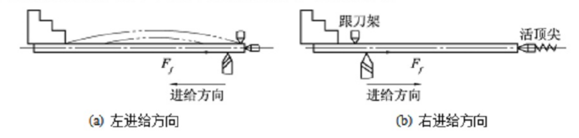
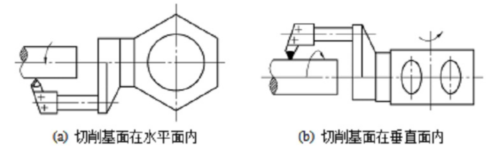


图 2.54 不同进给方向加工细长轴的比较

3. 转移原始误差

误差转移法是把影响加工精度的原始误差转移到不影响(或少影响)加工精度的方向或其他零部件上去。如图 2.55 所示就是利用转移误差的方法转移转塔车床转塔刀架转角误差的例子。转塔车床的转塔刀架在工作时需经常旋转，因此要长期保持它的转位精度是比较困难的。假如转塔刀架上外圆车刀的切削基面也像卧式车床那样在水平面内，如图 2.55(a)所示，那么转塔刀架的转位误差处在误差敏感方向，将严重影响加工精度。因此，生产中

都采用“立刀”安装法，把刀刃的切削基面放在垂直平面内(图 2.55(b))，这样就把刀架的转位误差转移到了误差的不敏感方向，由刀架转位误差引起的加工误差也就减少到可以忽略不计的程度。



(a) 切削基面在水平面内　　(b) 切削基面在垂直面内

图 2.55　转塔车床刀架转位误差的转移

4. 均分原始误差

在生产中会遇到这样的情况：本工序的加工精度是稳定的，但由于毛坯或上道工序加工的半成品精度起了变化，引起定位误差或复映误差太大，因而造成本工序的加工超差。解决这类问题最好采用分组调整(即均分误差)的方法：把毛坯按误差大小分为 n 组，每组毛坯的误差就缩小为原来的 $1/n$；然后按各组分别调整刀具与工件的相对位置或选用合适的定位元件，就可大大缩小整批工件的尺寸分散范围。这个办法比起提高毛坯精度或上道工序加工精度往往要简便易行些。

5. 均化原始误差

加工过程中，机床、刀具(磨具)等的误差总是要传递给工件的。机床、刀具的某些误差(例如导轨的直线度、机床传动链的传动误差等)只是根据局部地方的最大误差值来判定的。利用有密切联系的表面之间的相互比较、相互修正，或者利用互为基准进行加工，就能让这些局部较大的误差比较均匀地影响到整个加工表面，使传递到工件表面的加工误差较为均匀，因而工件的加工精度相应也就大大提高。

6. 就地加工法

在机械加工和装配中，有些精度问题牵涉到很多零部件的相互关系，如果单纯依靠提高零部件的精度来满足设计要求，有时不仅困难，甚至不可能。而采用就地加工法可解决这种难题。例如，在转塔车床制造中，转塔上 6 个安装刀架的大孔轴线必须保证与机床主轴回转轴线重合，各大孔的端面又必须与主轴回转轴线垂直。如果把转塔作为单独零件加工出这些表面，那么在装配后要达到上述两项要求是很困难的。采用就地加工方法，把转塔装配到转塔车床上后，在车床主轴上装镗杆和径向进给小刀架来进行最终精加工，就很容易保证上述两项精度要求。

就地加工法的要点是：要保证部件间什么样的位置关系，就在这样的位置关系上利用一个部件装上刀具去加工另一部件。

这种“自干自”的加工方法，生产中应用很多。如牛头刨床、龙门刨床为了使它们的工作台面分别对滑枕和横梁保持平行的位置关系，就都是在装配后在自身机床上进行“自刨自”的精加工。平面磨床的工作台面也是在装配后作“自磨自”的最终加工。

2.7.2 误差补偿技术

误差补偿的方法就是人为地造出一种新的原始误差去抵消当前成为问题的原有的原始误差，并应尽量使两者大小相等，方向相反，从而达到减少加工误差，提高加工精度的目的。

用误差补偿的方法来消除或减小常值系统误差一般来说是比较容易的，因为用于抵消常值系统误差的补偿量是固定不变的。对于变值系统误差的补偿就不是用一种固定的补偿量所能解决的。于是生产中发展了所谓积极控制的误差补偿法，积极控制有 3 种形式。

1. 在线检测

这种方法是在加工中随时测量出工件的实际尺寸(形状、位置精度)，随时给刀具以附加的补偿量以控制刀具和工件间的相对位置。这样，工件尺寸的变动范围始终在自动控制之中。现代机械加工中的在线测量和在线补偿就属于这种形式。

2. 偶件自动配磨

这种方法是将互配件中的一个零件作为基准，去控制另一个零件的加工精度。在加工过程中自动测量工件的实际尺寸，并和基准件的尺寸比较，直至达到规定的差值时机床就自动停止加工，从而保证精密偶件间要求很高的配合间隙。

3. 积极控制起决定作用的误差因素

在某些复杂精密零件的加工中，当无法对主要精度参数直接进行在线测量和控制时，就应该设法控制起决定作用的误差因素，并把它掌握在很小的变动范围以内。

本 章 小 结

本章对机械加工精度的概念、机械加工误差的概念、各种影响加工精度的主要因素及其控制方法、加工误差的统计分析以及保证和提高加工精度的主要措施作了系统的阐述。

机械加工精度是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和表面间的相互位置)与理想几何参数的符合程度。

机械加工误差是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和表面间的相互位置)与理想几何参数偏离程度。加工误差的主要来源是工艺系统的原始误差。

影响机械加工精度的因素有很多方面，主要包括原理误差、工艺系统的几何误差、工艺系统的受力变形、工艺系统的热变形等方面。

原理误差是指在机械加工中，由于采用了近似的成形运动或者近似的切削刃轮廓进行加工而产生的误差。工艺系统的几何误差主要反映在机床误差、夹具和刀具的制造误差与磨损、调整误差。反映工艺系统抵抗受力变形能力的参数是工艺系统的刚度。工艺系统的热变形对加工精度也有很大的影响。在以上几方面都介绍了一些减少加工精度影响的措施。

对于难以用单因素分析法分析的问题，采用数理统计的方法来进行分析。

误差预防和误差补偿是两种常用的保证和提高加工精度的途径。

习　题

(1) 什么是机械加工精度，它和机械加工误差有什么关系？

(2) 零件的加工精度包括哪 3 个方面？它们分别怎样获得？

(3) 什么是原始误差？试举例说明。

(4) 研究机械加工精度的目的是什么？研究机械加工精度的方法有哪些？

(5) 什么是原理误差？它对零件的加工精度有什么影响？

(6) 车床床身导轨在垂直平面内及水平面内的直线度对车削圆轴类零件的加工误差有什么影响，影响程度有何不同？

(7) 工艺系统的几何误差主要包括哪些方面？它们分别对机械加工精度有哪些影响？

(8) 什么是工艺系统刚度？它对机械加工精度有何影响？

(9) 试列举两种机床部件局部刚度的测定方法。

(10) 减小工艺系统受力变形对加工精度影响的措施有哪些？

(11) 减小残余应力的常用措施有哪些？

(12) 工件热变形、刀具热变形、机床热变形对加工精度各有哪些影响？

(13) 减小工艺系统热变形对加工精度影响的措施有哪些？

(14) 分布图分析法与点图分析法各有何特点？

(15) 常用的误差预防技术有哪些？

(16) 常用的误差补偿技术有哪些？

(17) 试分析在车床上加工时，产生下述误差的原因。

① 在车床上镗孔时，引起被加工孔圆度误差和圆柱度误差。

② 在车床三爪自定心卡盘上镗孔时，引起内径与外圆不同轴度；端面与外圆的不垂直度。

(18) 在车床上用两顶尖装夹工件车削长轴时，出现图 2.56 所示 3 种误差是什么原因，分别可采用什么办法来减少或消除？

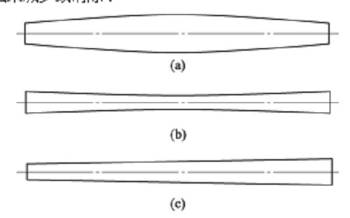


图 2.56　题(18)图

(19) 若车床床身铸件的导轨和床腿处存在着残余压应力，床身中间存在着残余拉应力，此时如果粗刨床身导轨，试用简图表示粗刨后床身将会产生怎样的变形形状？并简述其原因。

(20) 图 2.57 所示为 Y38 滚齿机的传动系统图，欲在此机床上加工 m=2、z=48 的直齿圆柱齿轮。已知：$i_{差}=1$，$i_{分}\dfrac{e}{f}\cdot\dfrac{a}{b}\cdot\dfrac{c}{d}=\dfrac{24K_{刀}}{z_1}=\dfrac{1}{2}$，若传动链中齿轮 z_1 (m=5)的周节误差为 0.08mm，齿轮 z_d (m=3)的周节误差为 0.1mm，蜗轮(m=5)的周节误差为 0.13mm。试分别计算由于它们各自的周节误差所造成被加工齿轮的周节误差各为多少？

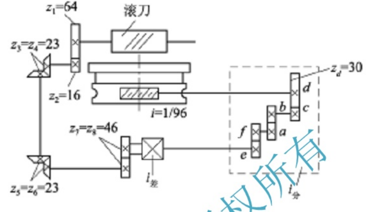


图 2.57　题(20)图

(21) 磨削薄壁零件时，由于工件单面受热，上下表面温差为 T，导致工件凸起，中间磨去较多，加工完冷却后表面产生中凹的形状误差。如工件为钢材，工件长度 L=1.5m，厚度 s=300mm，温差 T=1℃，求其形状误差值。

(22) 车削一批轴的外圆，其尺寸为 ϕ25mm±0.05mm，已知此工序的加工误差分布曲线是正态分布，其标准差 σ=0.025mm，曲线的顶峰位置位于公差带中值的左侧。试求零件的合格率和废品率。工艺系统经过怎样的调整可使废品率降低？

(23) 在自动机上加工一批尺寸为 ϕ8mm±0.09mm 的工件，机床调整完后试车 50 件，测得尺寸见表 2-9。

画出分布直方图，并计算加工后的合格品率和不合格品率。

表 2-9　题(20)表　　　　mm

试件号	尺寸	试件号	尺寸	试件号	尺寸	试件号	尺寸	试件号	尺寸
1	7.920	11	7.970	21	7.895	31	8.000	41	8.024
2	7.970	12	7.982	22	7.992	32	8.012	42	7.028
3	7.980	13	7.991	23	8.000	33	8.024	43	7.965
4	7.990	14	7.998	24	8.010	34	8.045	44	7.980
5	7.995	15	8.007	25	8.022	35	7.960	45	7.988
6	8.005	16	8.022	26	8.040	36	7.975	46	7.995
7	8.018	17	8.040	27	7.957	37	7.988	47	8.004
8	8.030	18	8.080	28	7.975	38	7.994	48	8.027
9	8.060	19	7.940	29	7.985	39	8.002	49	8.065
10	7.935	20	7.972	30	7.992	40	8.015	50	8.017

第 3 章　机械加工表面质量

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握机械加工表面质量的含义、主要内容及其对零件使用性能和寿命的影响	机械加工表面质量的描述、机械加工表面质量对零件使用性能和寿命的影响	15%	
掌握表面粗糙度形成的原因、影响表面粗糙度的因素及其对应的措施	切削加工的表面粗糙度、磨削加工的表面粗糙度	20%	
掌握表面层物理机械性能的变化及其影响因素	加工表面的冷作硬化、表面层金相组织的变化、表面层残余应力	20%	
了解常用的控制机械加工表面质量的措施	采用精密加工和光整加工降低表面粗糙度、采用表面强化工艺改善表面层物理机械性能	10%	
掌握机械加工中的振动现象及分类、各类振动的产生原因及特点	机械加工中的振动现象及分类、机械加工中的强迫振动、机械加工中的自激振动	15%	
了解机械加工中振动的诊断技术	强迫振动的诊断、再生型颤振的诊断	10%	
掌握消减机械加工中振动的途径	消减机械加工中振动的途径	10%	



引例

齿轮传动具有传递功率大、速度范围广、效率高、工作可靠、结构紧凑及能保证恒定传动比等优点，在各种装备中应用十分广泛。在这些装备中如果齿轮出现了故障，往往会带来工时的消耗和经济的损失。因此，研究齿轮出现故障的表现形式与原因就显得十分重要。



车轮的齿面点蚀

齿轮由于结构形式、运行环境等因素的不同，发生故障的形式也不同。常见的齿轮故障形式包括：轮齿折断、齿面磨损、齿面点蚀、齿面胶合、齿面与齿体的塑性变形等。在这些故障的成因中，有齿轮设计、制造、装配、热处理、润滑和工作环境等方面的因素。在齿轮制造这一类因素中，轮齿的表面质量是和齿轮故障有密切关系的主要因素之一。比如，上图中所示的点蚀现象，最初的原因就有可能是因为轮齿表面存在局部凸起，运行中局部承受较大负荷所导致。

3.1 概　　述

进行机械加工时，除了要获得所要求的加工精度之外，还希望获得完美的加工表面。但事实上，任何机械加工所得到的零件表面，都不可能是完全理想的表面。实际所获得的表面与理想表面之间的差距越大，越会对零件的使用产生较大的影响。

特别提示

实践表明，机械零件的破坏，一般总是从表面层开始的。这说明零件的表面质量是至关重要的，它对产品的质量有很大影响。

研究表面质量的目的，就是要掌握机械加工中各种工艺因素对加工表面质量影响的规律，以便应用这些规律控制加工过程，最终达到提高加工表面质量、提高产品使用性能的目的。

3.1.1 机械加工表面质量的描述

机械加工表面质量是指由一种或几种加工、处理方法所获得的表面层状况(几何的、物理的、化学的或其他工程性能的)与表面层技术要求的符合程度。它包括两方面的内容：加工表面的几何形状误差和表面层材质的物理机械性能变化。

1. 加工表面的几何形状误差

加工表面的几何形状误差包括以下 4 个部分，如图 3.1 所示。

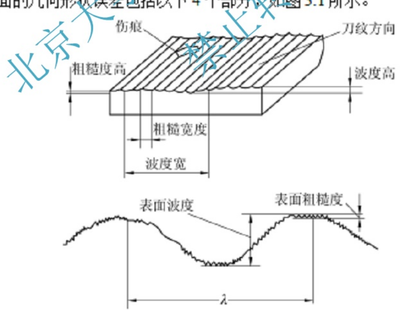


图 3.1　加工表面的几何形状误差

1) 表面粗糙度

表面粗糙度是指加工表面上较小间距和峰谷所组成的微观几何形状特征，即加工表面的微观几何形状误差，其波长与波高比值一般小于 50。其评定参数主要有轮廓算术平均偏差 Ra 或轮廓微观不平度十点平均高度 Rz 。

2) 波度

波度是介于宏观形状误差与微观表面粗糙度之间的周期性形状误差，它主要是由机械加工过程中低频振动引起的，应作为工艺缺陷设法消除。该类误差中，加工表面不平度中波长与波高的比值介于 50~1000 之间。当波长与波高的比值大于 1000 时，称为宏观几何形状误差，它们属于加工精度范畴。

3) 加工纹理方向

加工纹理方向是指表面刀纹的方向，它取决于表面形成过程中的机械加工方法及其切削运动的规律，图 3.2 给出了各种加工纹理方向及其符号标注。

4) 表面缺陷

表面缺陷是指加工表面上一些个别位置上出现的缺陷，如砂眼、气孔、裂痕、划痕等。它们大多随机分布。

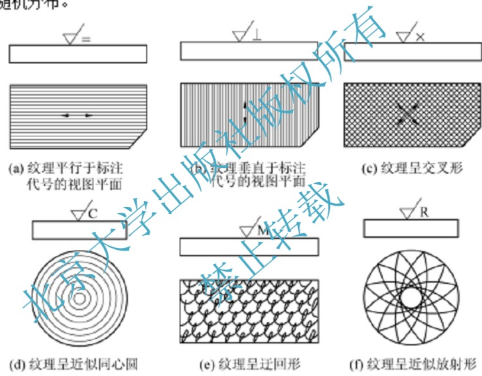


图 3.2　各种加工纹理方向及其符号标注

2. *表面层材质的物理机械性能变化*

由于机械加工中力因素和热因素的综合作用，加工表面层材质的物理机械性能将发生一定的变化，主要反映在以下几个方面。

(1) 加工表面层因塑性变形引起的冷作硬化。

表面层金属硬度的变化用硬化程度和硬化层深度两个指标来衡量。在机械加工过程中，工件表面层金属都会有一定程度的冷作硬化，使表面层金属的显微硬度有所提高。一般情况下，硬化层的深度可达 0.05~0.30mm；若采用滚压加工，硬化层的深度可达几个毫米。

(2) 加工表面层因切削加工产生高温引起的金相组织变化。

机械加工过程中，由于切削热的作用会引起表面层金属的金相组织发生变化。在磨削淬火钢时，由于磨削热的影响会引起淬火钢马氏体的分解，或出现回火组织等。

(3) 加工表面层因力或热的作用产生的残余应力。

由于切削力和切削热的综合作用，表面层金属晶格会发生不同程度的塑性变形或产生金相组织的变化，使表层金属产生残余应力。

随着科学技术的不断发展，人们对零件加工表面质量的研究日益深入，表面质量的内涵也在不断扩大，已经出现了表面完整性的全新概念。它除了前面所介绍的内容外，还包括表面的工程技术特性，如表面层的摩擦、光反射、导电特性等。

3.1.2　机械加工表面质量对零件使用性能和寿命的影响

在机器零件的机械加工中，加工表面产生的表面微观几何形状误差和表面层物理机械性能的变化，虽然只发生在很薄的表面层中，但长期的实践证明它们都影响机器零件的使用性能(即零件的工作精度及其保持性、零件的抗腐蚀性、零件的疲劳强度和零件与零件之间的配合性质等)，从而进一步影响机器产品的使用性能和使用寿命。

1. 表面质量对耐磨性的影响

1) 表面粗糙度、波纹度对耐磨性的影响

零件的耐磨性是零件的一项重要性能指标，当摩擦副的材料、润滑条件和加工精度确定之后，零件的表面质量对耐磨性将起着关键性的作用。

由于零件表面存在微观不平度，当两个零件表面相互接触时，实际上有效接触面积只是名义接触面积的一小部分，表面波纹度越大、粗糙度越大，有效接触面积就越小。在两个零件做相对运动时，开始阶段由于接触面小，压强大，在接触点的凸峰处会产生弹性变形、塑性变形及剪切等现象，这样凸峰很快就会被磨掉。被磨掉的金属微粒落在相配合的摩擦表面之间，会加速磨损过程。即使是有润滑液存在的情况下，也会因为接触点处压强过大，破坏油膜，形成干摩擦。零件表面在起始磨损阶段的磨损速度很快，起始磨损量较大(图 3.3)；随着磨损的发展，有效接触面积不断增大，压强也逐渐减小，磨损将以较慢的速度进行，进入正常的磨损阶段；在这之后，由于有效接触面积越来越大，零件间的金属分子亲和力增加，表面的机械咬合作用增大，使零件表面又产生急剧磨损而进入快速磨损阶段，此时零件将不能再使用。所以，零件磨损过程可分为如下 3 个阶段：初期磨损阶段、正常磨损阶段和剧烈磨损阶段。

特别提示

表面粗糙度对零件表面磨损的影响很大。一般说来，表面粗糙度值越小，其耐磨性越好；但是表面粗糙度值太小，因接触面容易发生分子粘接，且润滑液不易储存，磨损反而增加；因此，就磨损而言，存在一个最优表面粗糙度值。

表面粗糙度的最优数值与机器零件工况有关，图 3.4 给出了不同工况下表面粗糙度数值与起始磨损量的关系曲线。载荷加大时，起始磨损量增大，最优表面粗糙度数值也随之加大。

2) 表面纹理对耐磨性的影响

表面纹理的形状及刀纹方向对耐磨性也有一定的影响，其原因在于纹理形状及刀纹方向将影响有效接触面积与润滑液的存留。一般来说，圆弧状、凹坑状表面纹理的耐磨性好；尖峰状的表面纹理由于摩擦副接触面压强大，耐磨性较差。在运动副中，两相对运动零件

表面的刀纹方向均与运动方向相同时，耐磨性较好；两者的刀纹方向均与运动垂直时，耐磨性最差；其余情况属于上述两种状态之间。但在重载工况下，由于压强、分子亲和力及润滑液储存等因素的变化，耐磨性规律可能会有所不同。

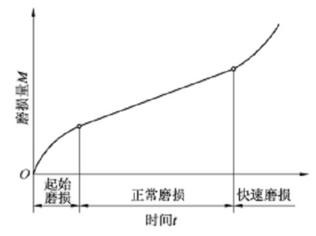


图 3.3　零件表面的磨损曲线

图 3.4　表面粗糙度值与起始磨损量的关系

3) 冷作硬化对耐磨性的影响

加工表面的冷作硬化，一般都能使耐磨性有所提高。其主要原因是：冷作硬化使表面层金属的纤维硬度提高，塑性降低，减少了摩擦副接触部分的弹性变形和塑性变形，故可减少磨损；但并不是说冷作硬化程度越高，耐磨性也越高。图 3.5 所示为 T7A 钢的磨损量随冷作硬化程度的变化而变化的情况，当冷作硬化硬度达 380HBS 左右时，耐磨性最佳；如进一步加强冷作硬化，耐磨性反而降低。这是因为过度的硬化将引起金属组织疏松，在相对运动中可能会产生金属剥落，在接触面间形成小颗粒，这会加速零件的磨损。

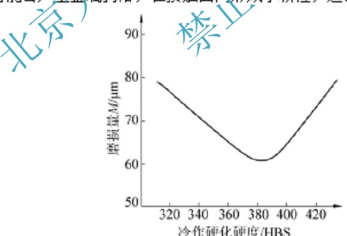


图 3.5　T7A 钢车削加工后，冷作硬化程度与耐磨性的关系

2. 表面质量对耐疲劳性的影响

1) 表面粗糙度对耐疲劳性的影响

表面粗糙度对承受交变载荷零件的疲劳强度影响很大。表面粗糙度值越小，表面缺陷越少，工件耐疲劳性越好；反之，加工表面越粗糙，表面的纹痕越深，纹底半径越小，其抵抗破坏的能力越差。

表面粗糙度对耐疲劳性的影响还与材料对应力集中的敏感程度和材料的强度极限有

关。钢材对应力集中最为敏感，钢材的强度越高，对应力集中的敏感程度就越大，而铸铁和非铁金属对应力集中的敏感性相对较弱。

2) 表面层金属的物理机械性质对耐疲劳性的影响

表面层金属的冷作硬化能够阻止疲劳裂纹的生长，可提高零件的耐疲劳强度。表层加工硬化适度会提高疲劳强度，过大易产生裂纹。在实际加工中，加工表面在发生冷作硬化的同时，必然伴随产生残余应力。残余应力有拉应力和压应力之分，拉伸残余应力促使裂纹扩展，将使耐疲劳强度下降，而压缩残余应力则可阻止裂纹扩展，使耐疲劳强度提高。

3. 表面质量对耐蚀性的影响

1) 表面粗糙度对耐蚀性的影响

零件的耐腐蚀性在很大程度上取决于表面粗糙度。大气里所含气体和液体与金属表面接触时，会凝聚在金属表面上而使金属腐蚀。表面粗糙度值越大，加工表面与气体、液体接触的面积越大，腐蚀物质越容易沉积于凹坑中，耐蚀性能就越差。

2) 表面层物理机械性能对耐蚀性的影响

表层加工硬化及金相组织变化易产生内应力，导致应力腐蚀开裂，降低零件腐蚀性，而内应力有利微裂纹闭合。当零件表面层有残余应力时，能够阻止表面裂纹的进一步扩大，有利于提高零件表面抵抗腐蚀的能力。

4. 表面质量对零件配合质量的影响

对于机器中相配合的零件，无论是间隙配合、过渡配合，还是过盈配合，若加工表面的粗糙度过大，则必然要影响到它们的实际配合性质。

相配合零件间的配合性质是由过盈量或间隙量来决定的。加工表面如果太粗糙，必然要影响配合表面的配合质量。对于间隙配合表面，起始磨损的影响最为显著，零件配合表面的起始磨损量与表面粗糙度的平均高度成正比增加，原有间隙将因急剧的起始磨损而改变，表面粗糙度越大，变化量就越大，从而影响配合的稳定性。对于过盈配合表面，表面粗糙度越大，两表面相配合时表面凸峰易被挤掉，这会使过盈量减少，降低了配合件的连接强度，影响了配合的可靠性。对于过渡配合表面，则兼有上述两种配合的影响。

5. 表面质量对零件其他使用特性的影响

表面质量对零件的使用性能还有一些其他的影响。如对间隙密封的液压缸、滑阀来说，减小表面粗糙度 Ra 可以减少泄漏、提高密封性能；数值较小的表面粗糙度可使零件具有较高的接触刚度；对于滑动零件，减小表面粗糙度 Ra 能使摩擦系数降低、运动灵活性增高，减少发热和功率损失；表面层的残余应力会使零件在使用过程中继续变形，原有的精度，机器工作性能恶化等。

总之，提高加工表面质量，对于保证零件的使用性能，提高零件的使用寿命是十分重要的。

3.2 表面粗糙度的形成及其影响因素

表面粗糙度是在机械加工过程中所产生的，影响加工表面粗糙度的工艺因素主要有几

何因素和物理因素两个方面。不同的加工方式，影响加工表面粗糙度的工艺因素各不相同。

3.2.1　切削加工的表面粗糙度

在切削加工中，影响已加工表面粗糙度的因素主要包括几何因素、物理因素和加工中工艺系统的振动，下面以车削为例说明。

1．几何因素

切削加工时表面粗糙度的值主要取决于切削残留面积的高度。影响切削残留面积高度的因素主要包括：刀尖圆弧半径 r_ε、主偏角 κ_r、副偏角 κ_r' 及进给量 f 等。

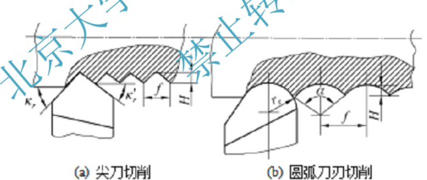
图 3.6 给出了车削、刨削时残留面积高度的计算示意图。图 3.6(a)是用尖刀切削的情况，切削残留面积的高度为：

$$H = \frac{f}{\cot\kappa_r + \cot\kappa_r'} \tag{3-1}$$

图 3.6(b)是用圆弧刀刃切削的情况，切削残留面积的高度为 $H = \frac{f}{2}\tan\frac{\alpha}{4}$，经推导，略去二次微小量，整理得：

$$H \approx \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \tag{3-2}$$

从式(3-1)和式(3-2)可知，进给量 f 和刀尖圆弧半径 r_ε 对切削加工表面粗糙度的影响比较明显。切削加工时，选择较小的进给量 f 和较大的刀尖圆弧半径 r_ε 将会使表面粗糙度得到改善。



(a) 尖刀切削　　(b) 圆弧刀刃切削

图 3.6　车削、刨削时残留面积的高度

由于刀具切削刃的几何形状、几何参数、进给速度及切削刃本身的粗糙度等原因，未能将被加工表面上的材料层完全干净地去除掉，在已加工表面上遗留下残留面积，残留面积的高度构成了表面粗糙度 R_z。

刀具切削刃的粗糙度由于直接反映在加工表面上，所以刀具切削刃的表面粗糙度值，应低于被加工表面要求的粗糙度值。

2．物理因素

切削加工后表面的实际轮廓与纯几何因素所形成的理想轮廓往往都有较大差别，这主要是因为在加工过程中还有塑性变形等因素的影响。这些物理因素的影响一般比较复杂，它与切削原理中所叙述的加工表面形成过程有关，如在加工过程中产生的积屑瘤、鳞刺和

振动等对加工表面的粗糙度均有很大影响。现对影响加工表面粗糙度的物理因素分别予以分析。

1) 切削用量的影响

(1) 进给量 f 的影响。在粗加工和半精加工中，当 f>0.15mm/r 时，对表面粗糙度 R_z 的影响很大，符合前述的几何因素的影响关系。当 f<0.15mm/r 时，则 f 的进一步减少就不能引起 R_z 明显的降低。f<0.02mm/r 时，就不再使 R_z 降低，这时加工表面粗糙度主要取决于被加工表面的金属塑性变形程度。

(2) 切削速度的影响。加工塑性材料时，切削速度对表面粗糙度的影响较大。切削速度越高，切削过程中切屑和加工表面层的塑性变形程度越轻，加工后表面粗糙度也就越低。

当切削速度较低时，刀刃上易出现积屑瘤，它将使加工表面的粗糙度提高。实验证明，当切削速度下降到某一临界值以下时，R_z 将明显提高。产生积屑瘤的临界速度将随加工材料、冷却润滑及刀具状况等条件的不同而不同。

由此可见，用较高的切削速度，既可使生产效率提高又可使表面粗糙度下降，所以不断地创造条件以提高切削速度，一直是提高工艺水平的重要方向。其中，发展新刀具材料和采用先进刀具结构，常可使切削速度大为提高。

加工脆性材料时，切削速度对表面粗糙度的影响不大。一般说，切削脆性材料比切削塑性材料容易达到表面粗糙度的要求。

(3) 切削深度的影响。一般来说，切削深度对加工表面粗糙度的影响是不明显的。但当切削深度小到一定数值以下时，由于刀刃磨时不可能刃磨得绝对尖锐，而是具有一定的刃口半径，这时正常切削就不能维持，常出现挤压、打滑和周期性地切入加工表面等现象，从而使表面粗糙度提高。为降低加工表面粗糙度，应根据刀具刃口刃磨的锋利情况选取相应的切削深度值。

2) 工件材料性能的影响

工件材料的韧性和塑性变形倾向越大，切削加工后的表面粗糙度越高。如低碳钢的工件，加工后的表面粗糙度就高于中碳钢工件。由于黑色金属材料中的铁素体的韧性好，塑性变形大，若能将铁素体——珠光体组织转变为索氏体或屈氏体——马氏体组织，就可降低加工后的表面粗糙度。

工件材料金相组织的晶粒越均匀、颗粒越细，加工时越能获得较低的表面粗糙度。为此，对工件进行正火或回火处理后再加工，能使加工表面粗糙度明显降低。

3) 刀具材料的影响

不同的刀具材料，由于化学成分的不同，在加工时其前后刀面硬度及粗糙度的保持性、刀具材料与被加工材料金属分子的亲和程度，以及刀具前后刀面与切屑和加工表面间的摩擦因数等均有所不同。实验证明，在相同的切削条件下，用硬质合金刀具加工所获得的表面粗糙度要比用高速钢刀具加工所获得的低。

采用金刚石刀具加工比采用硬质合金刀具加工所获得的表面粗糙度还要低很多，主要用于有色金属及其合金零件表面的镜面加工。

此外，合理选择刀具的角度，适当增大刀具的前角和刃倾角；提高刀具的刃磨质量，降低刀具前后刀面本身的粗糙度以及合理地选择冷却润滑液等，均能有效地降低加工表面的粗糙度。

3．工艺系统振动

工艺系统的低频振动，一般在工件的已加工表面上产生表面波度，而工艺系统的高频振动将对已加工表面的粗糙度产生影响。为降低加工表面的粗糙度，则必须采取相应措施以防止加工过程中高频振动的产生。

在上述影响加工表面粗糙度的几何因素和物理因素中，究竟哪个为主，这要根据不同情况而定。一般来说，对脆性金属材料的加工是以几何因素为主，而对塑性金属材料的加工，特别是韧性大的材料则是以物理因素为主。此外，还要考虑具体的加工方法和加工条件，如对切削截面很小和切削速度很高的高速细镗加工，其表面粗糙度主要是由几何因素引起的。对切削截面宽而薄的铰孔加工，由于刀刃很直很长，切削加工时从几何因素分析不应产生任何表面粗糙度，因此主要是物理因素引起的。

3.2.2　磨削加工的表面粗糙度

磨削加工表面粗糙度的形成因素和切削加工是类似的，但磨削过程要比切削过程复杂得多。

1．几何因素

磨削表面是由砂轮上大量的磨粒刻划出的无数极细的沟槽形成的。单纯从几何因素考虑，可以认为在单位面积上刻痕越多，即通过单位面积的磨粒数越多，刻痕的等高性越好，则磨削表面的粗糙度值越小。

1) 磨削用量对表面粗糙度值的影响

砂轮的速度越高，单位时间内通过被磨表面的磨粒数就越多，因而工件表面的粗糙度值就越小。

工件速度对表面粗糙度的影响刚好与砂轮速度的影响相反，增大工件速度时，单位时间内通过被磨表面的磨粒数减少，表面粗糙度值将增大。

砂轮的纵向进给减少，工件表面的每个部位被砂轮重复磨削的次数增加，被磨表面的粗糙度值将减小。

2) 砂轮粒度和砂轮修整对表面粗糙度的影响

砂轮的粒度不仅表示磨粒的大小而且还表示磨粒之间的距离。表 3-1 列出了 5 号组织，不同粒度的砂轮的磨粒尺寸和磨粒之间的距离。

表 3-1　磨粒尺寸和磨粒之间的距离

砂轮粒度	磨粒的尺寸范围/μm	磨粒间的平均距离/mm
36#	500～600	0.475
46#	355～425	0.369
60#	250～300	0.255
80#	180～212	0.228

磨削金属时，参与磨削的每一颗磨粒都会在加工表面上刻出跟它的大小和形状相同的一道小沟。在相同的磨削条件下，砂轮的粒度号数越大，参加磨削的磨粒越多，表面粗糙度值就越小。

修整砂轮的纵向进给量对磨削表面的粗糙度影响甚大。用金刚石修整砂轮时，金刚石在砂轮外缘上打出一道螺旋槽，其螺距等于砂轮转一转时金刚石笔在纵向的移动量。砂轮表面的不平整在磨削时将被复映到被加工表面上。修整砂轮时，金刚石笔的纵向进给量越小，砂轮表面磨粒的等高性越好，被磨工件的表面粗糙度值就越小。小表面粗糙度值磨削的实践表明，修整砂轮时，砂轮转一转金刚石笔的纵向进给量如能减少到 0.01mm，磨削表面粗糙度 R_z就可达到 0.1～0.2μm 。

2. 物理因素

砂轮的磨削速度远比一般切削加工的速度高得多，且磨粒大多为负前角，磨削比压大，磨削区温度很高，工件表面温度有时可达 900℃，工件表面金属容易产生相变而烧伤。因此，磨削过程的塑性变形要比一般切削过程大得多。

由于塑性变形的缘故，被磨表面的几何形状与单纯根据几何因素所得到的原始形状大不相同。在力因素和热因素的综合作用下，被磨工件表面金属的晶粒在横向上被拉长了，有时还产生细微的裂口和局部的金属堆积现象。影响磨削表层金属塑性变形的因素，往往是影响表面粗糙度的决定性因素。

1) 磨削用量

图 3.7 是采用 GD60ZR2A 砂轮磨削 30CrMnSiA 材料时，磨削用量对表面粗糙度的影响曲线。

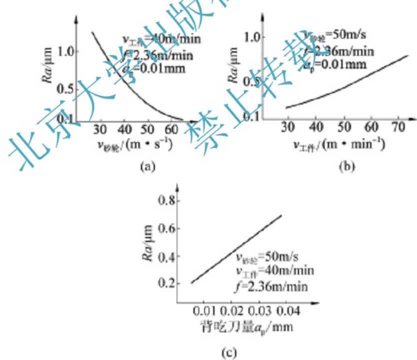


图 3.7 磨削用量对表面粗糙度的影响

砂轮速度越高，工件材料来不及变形，表层金属的塑性变形减小，磨削表面的粗糙度值将明显减小。

工件速度增加，塑性变形增加，表面粗糙度值将增大。

背吃刀量对表层金属塑性变形的影响很大。增大背吃刀量，塑性变形将随之增大，被磨表面的粗糙度值会增大。

2) 砂轮的选择

砂轮的粒度、硬度、组织和材料的选择不同，都会对被磨工件表层金属的塑性变形产生影响，进而影响表面粗糙度。

单纯从几何因素考虑，砂轮粒度越细，磨削的表面粗糙度值越小。但磨粒太细时，不仅砂轮易被磨屑堵塞，若导热情况不好，反而会在加工表面产生烧伤等现象，使表面粗糙度值增大。砂轮粒度常取为 46～60 号。

砂轮的硬度是指磨粒在磨削力作用下从砂轮上脱落的难易程度。砂轮选得太硬，磨粒不易脱落，磨钝了的磨粒不能及时被新磨粒替代，使表面粗糙度增大。砂轮选得太软，磨粒易脱落，磨削作用减弱，也会使表面粗糙度值增大，通常选用中软砂轮。

砂轮的组织是指磨粒、结合剂和气孔的比例关系。紧密组织中磨粒所占比例大、气孔小，在成形磨削和精密磨削时，能获得高精度和较小的表面粗糙度值。疏松组织的砂轮不易堵塞，适于磨削软金属、非金属软材料和热敏性材料(磁钢、不锈钢、耐热钢等)，可获得较小的表面粗糙度值。一般情况下，应选用中等组织的砂轮。

砂轮材料的选择也很重要。砂轮材料选择适当，可获得满意的表面粗糙度。氧化物(刚玉)砂轮适于磨削钢类零件；碳化物(碳化硅、碳化硼)砂轮适于磨削铸铁、硬质合金等材料；用高硬材料(人造金刚石、立方氮化硼)砂轮磨削可获得极小的表面粗糙度值，但加工成本高。

此外，磨削液的作用也十分重要。对于磨削加工来说，由于磨削温度很高，热因素的影响往往占据主导地位。必须采取切实可行的措施，将磨削液送入磨削区。

3. 工艺系统振动

工艺系统的振动也引起磨削表面粗糙度的增大，所以增加工艺系统刚度和阻尼，做好砂轮的动平衡也可显著降低表面粗糙度。

3.3　表面层物理机械性能的变化及其影响因素

在切削加工中，工件由于受到切削力和切削热的作用，使表面层金属的物理机械性能产生变化，最主要的变化是表面层冷作硬化、金相组织的变化和残余应力的产生。在磨削加工时所产生的塑性变形和切削热比切削加工时更严重，因而磨削加工表面层上述三项物理机械性能的变化会很大。

3.3.1　加工表面的冷作硬化

1. 概述

机械加工过程中产生的塑性变形，使晶格扭曲、畸变，晶粒间产生滑移，晶粒被拉长，这些都会使表面层金属的硬度增加，统称为冷作硬化(或称为强化)。表层金属冷作硬化的结果，会增大金属变形的阻力，减少金属的塑性，金属的物理性质(如密度、导电性、导热性等)也会发生变化。

金属冷作硬化的结果，使金属处于高能位不稳定状态，只要一有条件，金属的冷硬结构就会本能地向比较稳定的结构转化，这些现象统称为弱化。机械加工过程中产生的切削热，将使金属在塑性变形中产生的冷硬现象得到恢复。

由于金属在机械加工过程中同时受到力因素和热因素的作用，机械加工后表面层金属的最后性质取决于强化和弱化两个过程的综合。

评定冷作硬化的指标有下列三项。

(1) 表层金属的显微硬度 HV。

(2) 硬化层深度 h(μm) 。

(3) 硬化程度 N:

$$N = \frac{HV - HV_0}{HV_0} \times 100\% \tag{3-3}$$

式中　HV_0——工件内部金属原来的硬度。

2. 影响切削加工表面冷作硬化的因素

1) 切削用量的影响

切削用量中以进给量和切削速度的影响为最大。图 3.8 给出了在切削 45 钢时，进给量和切削速度对冷作硬化的影响。由图可知，加大进给量时，表层金属的显微硬度将随之增加；这是因为随着进给量的增大，切削力也增大，表层金属的塑性变形加剧，冷硬程度增大。但是，这种情况只是在进给量比较大时才是正确的；如果进给量很小，如切削厚度小于 0.05～0.06mm 时，若继续减小进给量，则表层金属的冷硬程度不仅不会减小，反而会增大。

增大切削速度，刀具与工件的作用时间减少，使塑性变形的扩展深度减小，因而冷硬层深度减小；但增大切削速度，切削热在工件表面层上的作用时间也缩短了，将使冷硬程度增加。在图 3.8 和图 3.9 加工条件下，增大切削速度，都出现了冷硬程度随之增大的情况。但在某些加工条件下，切削速度对冷硬的影响规律却与此相反。例如，车削 Q235A 钢在切削速度为 14m/min 时，冷硬层深度达到 100μm；而切削速度提高到 208m/min 时，冷硬层深度才只有 38μm，冷硬程度也显著降低，切削速度对冷硬程度的影响是力因素和热因素综合作用的结果。

背吃刀量对表层金属冷作硬化的影响不大。

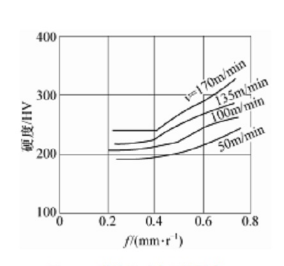


图 3.8　进给量对冷硬的影响

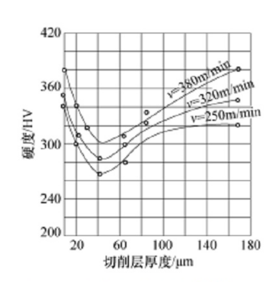


图 3.9　切削层厚度对冷硬的影响

2) 刀具几何形状的影响

切削刃钝圆半径的大小对切屑形成过程的进行有决定性影响。实验证明，已加工表面的显微硬度随着切削刃钝圆半径的加大而明显地增大；这是因为切削刃钝圆半径增大，径向切削分力也将随之加大，表层金属的塑性变形程度加剧，导致冷硬增大。

前角在 ±20℃范围内变化时，对表层金属的冷硬没有显著的影响。

刀具磨损对表层金属的冷硬影响很大。图 3.10 是苏联学者试验所得结果。由图可知，刀具后刀面磨损宽度 VB 从 0 增大到 0.2mm，表层金属的显微硬度由 220HV 增大到 340HV，这是由于磨损宽度加大之后，刀具后刀面与被加工工件的摩擦加剧，塑性变形增大，导致表面冷硬增大，但磨损宽度继续加大，摩擦热将急剧增大，弱化趋势明显增大，表层金属的显微硬度逐渐下降，直至稳定在某一水平上。

刀具后角 α，主、副偏角 κ_r、κ_r' 及刀尖圆弧半径 r_ε 等对表层金属的冷硬影响不大。

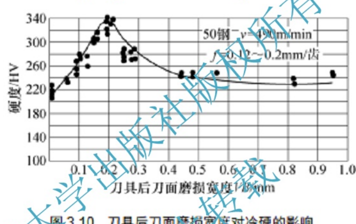


图 3.10　刀具后刀面磨损宽度对冷硬的影响

3) 加工材料性能的影响

工件材料的塑性越大，冷硬倾向越大，冷硬程度也越严重。碳钢中含碳量越大，强度越高，其塑性就越小，因而冷硬程度就越小。有色合金金属的熔点低，容易弱化，冷作硬化现象比钢材轻得多。

3. 影响磨削加工表面冷作硬化的因素

1) 工件材料性能的影响

分析工件材料对磨削表面冷作硬化的影响，可以从材料的塑性和导热性两个方面考虑。磨削高碳工具钢 T8，加工表面冷硬程度平均可达 60%~65%，个别可达 100%；而磨削纯铁时，加工表面冷硬程度可达 75%~80%，有时可达 140%~150%。其原因是纯铁的塑性好，磨削时的塑性变形大，强化倾向大；此外，纯铁的导热性比高碳工具钢高，热不容易集中于表面层，弱化倾向小。

2) 磨削用量的影响

加大背吃刀量，磨削力随之增大，磨削过程的塑性变形加剧，表面冷硬倾向增大，图 3.11 是磨削高碳工具钢 T8 的实验曲线。

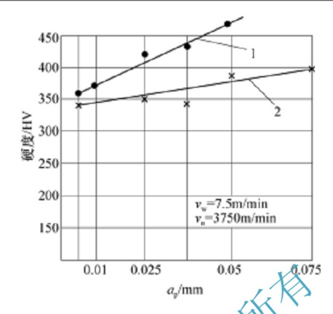


图 3.11　磨削深度对冷硬的影响

1—普通磨削　2—高速磨削

加大纵向进给速度，每颗磨粒的切屑厚度随之增大，磨削力加大，冷硬增大。但提高纵向进给速度，有时又会使磨削区产生较大的热量而使冷硬减弱。加工表面的冷硬状况要综合考虑上面两种因素的作用。

提高工件转速，会缩短砂轮对工件的作用时间，使软化倾向减弱，因而表面层的冷硬增大。

提高磨削速度，每颗磨粒切除的切削厚度变小，减弱了塑性变形程度；磨削区的温度增高，弱化倾向增大。高速磨削时加工表面的冷硬程度总比普通磨削时低，图 3.11 的实验结果就说明了这个问题。

3) 砂轮粒度的影响

砂轮的粒度越大，每颗磨粒的载荷越小，冷硬程度也越小。

表 3-2 列出了用各种机械加工方法(采用一般切削用量)加工钢件时，加工表面冷硬层深度和冷硬程度的部分数据。

表 3-2　用各种机械加工方法加工钢件的表面层冷作硬化情况

加工方法	材料	硬化层深度 h/μm		硬化程度 N/(%)	
		平均值	最大值	平均值	最大值
车削	低碳钢	30～50	200	20～50	100
精细车削		20～60	—	40～80	120
端铣		40～100	200	40～60	100
圆周铣		40～80	100	20～40	80

4．冷作硬化的测量方法

冷作硬化的测量主要是指表面层的显微硬度 HV 和硬化层深度 h 的测量，硬化程度 N 可由表面层的显微硬度 HV 和工件内部金属原来的显微硬度 H_{V0} 通过式(3-3)计算求得。表

面层显微硬度 HV 的常用测定方法是用显微硬度计来测量，它的测量原理与维氏硬度计相同，都是采用顶角为 136° 的金刚石压头在试件表面上打印痕，根据印痕的大小决定硬度值。所不同的只是显微硬度计所用的载荷很小，一般都只在 2N 以内(维氏硬度计的载荷为 50～1200N)，印痕极小。

加工表面冷硬层很薄时，可在斜截面上测量显微硬度。对于平面试件可按图 3.12(a)磨出斜面，然后逐点测量其显微硬度，并将测量结果绘制成如图 3.12(b)所示图形。采用斜截面测量法，不仅可以测量显微硬度，还能较为准确地测出硬化层深度 h。由图 3.12(a)可知：$h = l\sin\alpha + R_z$。

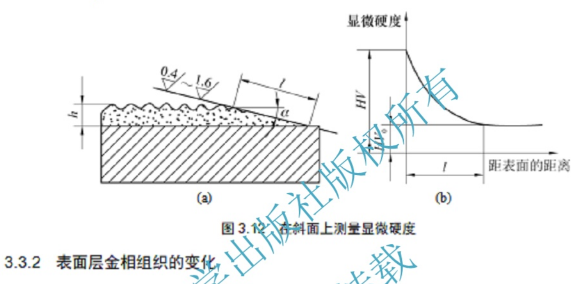


图 3.12　在斜面上测量显微硬度

3.3.2　表面层金相组织的变化

1. 机械加工表面金相组织的变化

机械加工过程中，在工件的加工区及其邻近的区域，温度会急剧升高，当温度升高到超过工件材料金相组织变化的临界点时，就会发生金相组织变化。对于一般的切削加工方法倒不至于严重到如此程度。但磨削加工不仅磨削比压特别大，且磨削速度也特别高，切除单位体积金属的功率消耗远大于其他加工方法，而加工所消耗能量的绝大部分都要转化为热，这些热量中的大部分(约 80%)将传给被加工表面，使工件表面具有很高的温度。

特别提示

对于已淬火的钢件，很高的磨削温度往往会使表面层金属的金相组织产生变化，使表层金属硬度下降，使工件表面呈现氧化膜颜色，这种现象称为磨削烧伤。

磨削加工是一种典型的容易产生加工表面金相组织变化的加工方法，在磨削加工中若出现磨削烧伤现象，将会严重影响零件的使用性能。

磨削淬火钢时，在工件表面形成的瞬时高温将使表层金属产生以下 3 种金相组织变化。

(1) 如果磨削区的温度未超过淬火钢的相变温度(碳钢的相变温度为 720℃)，但已超过马氏体的转变温度(中碳钢为 300℃)，工件表面金属的马氏体将转化为硬度较低的回火组织(索氏体或托氏体)，这称为回火烧伤。

(2) 如果磨削区温度超过了相变温度，再加上冷却液的急冷作用，表层金属会出现二次淬火马氏体组织，硬度比原来的回火马氏体高；在它的下层，因冷却较慢，出现了硬度比原来的回火马氏体低的回火组织(索氏体或托氏体)，这称为淬火烧伤。

(3) 如果磨削区温度超过了相变温度，而磨削过程又没有冷却液，表层金属将产生退火组织，表层金属的硬度将急剧下降，这称为退火烧伤。

2. 减小磨削烧伤的工艺途径

1) 正确选择砂轮

磨削导热性差的材料(如耐热钢、轴承钢及不锈钢等)，容易产生烧伤现象，应特别注意合理选择砂轮的硬度、结合剂和组织。硬度太高的砂轮，砂轮钝化之后不易脱落，容易产生烧伤。为避免产生烧伤，应选择较软的砂轮。选择具有一定弹性的结合剂(如橡胶结合剂、树脂结合剂)，也有助于避免烧伤现象的产生。此外，为了减少砂轮与工件之间的摩擦热，在砂轮的孔隙内浸入石蜡之类的润滑物质，对降低磨削区的温度，防止工件烧伤也有一定效果。

2) 合理选择磨削用量

现以平磨为例来分析磨削用量对烧伤的影响。磨削背吃刀量 a_p 对磨削温度影响极大，如图 3.13 所示。从减轻烧伤的角度考虑，a_p 的取值不宜过大。

增大横向进给量 f_t 对减轻烧伤有好处。图 3.14 给出了横向进给量 f_t 对磨削温度分布影响的实验结果，为了减轻烧伤，宜选用较大的横向进给量。

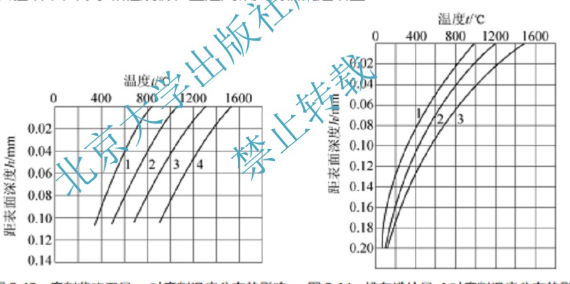


图 3.13 磨削背吃刀量 a_p 对磨削温度分布的影响

1— a_p=0.01mm 2— a_p=0.02mm

3— a_p=0.04mm 4— a_p=0.06mm

实验条件：v_s=35m/s；v_w=0.5m/min；f_t=12mm/单行程

图 3.14 横向进给量 f_t 对磨削温度分布的影响

1— f_t=24mm/单行程 2— f_t=12mm/单行程

3— f_t=6mm/单行程

实验条件：v_s=35mm/s；v_w=1m/s；a_p=0.02mm

增大工件的回转速度 v_w，磨削表面的温度会升高，但其增长速度与磨削背吃刀量 a_p 的影响相比小得多；且 v_w 越大，热量越不容易传入工件内层，具有减小烧伤层深度的作用。增大工件速度 v_w 当然会使表面粗糙度增大，为了弥补这一缺陷，可以相应提高砂轮速度 v_s，实践证明，同时提高砂轮速度 v_s 和工件速度 v_w，可以避免产生烧伤。

从减轻烧伤而同时又能有较高的生产率考虑，在选择磨削用量时，应选用较大的工件速度 v_w 和较小的磨削背吃刀量 a_p。

3) 改善冷却条件

磨削时磨削液若能直接进入磨削区，对磨削区进行充分冷却，能有效地防止烧伤现象的产生。因为水的比热和汽化热都很高，在室温条件下，1mL 水变成 100℃以上的水蒸气至少能带走 2512J 的热量；而磨削区热源每秒钟的发热量，在一般磨削用量下都在 4187J 以下。

据此可以推测，只要设法在每秒钟时间内确有 2mL 的冷却水进入磨削区，将有相当可观的热量被带走，就可以避免产生烧伤。然而，目前通用的冷却方法(图 3.15)效果很差，实际上没有多少磨削液能够真正进入磨削区。须采取切实可行的措施，改善冷却条件，防止烧伤现象产生。

内冷却(图 3.16)是一种较为有效的冷却方法。其工作原理是，经过严格过滤的冷却液通过中空主轴法兰套引入砂轮的中心腔 3 内，由于离心力的作用，这些冷却液就会通过砂轮内部的孔隙向砂轮四周的边缘洒出，因此冷却水就有可能直接进入磨削区。目前，内冷却装置尚未得到广泛应用，其主要原因是使用内冷却装置时，磨床附近有大量水雾，操作工人劳动条件差，精磨时无法通过观察火花试磨对刀。

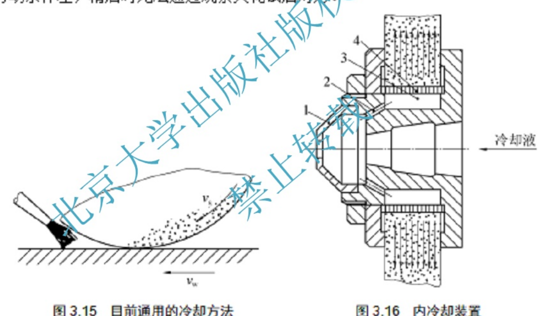


图 3.15 目前通用的冷却方法

图 3.16 内冷却装置

1—锥形盖 2—通道孔 3—砂轮中心腔
4—有径向小孔的薄壁套

4) 选用开槽砂轮

在砂轮的圆周上开一些横槽，能使砂轮将冷却液带入磨削区，对防止工件烧伤十分有效。开槽砂轮的形状如图 3.17 所示，目前常用的开槽砂轮有均匀等距开槽(图 3.17(a))和在 90°之内变距开槽(图 3.17(b))两种形式。采用开槽砂轮，能将冷却液直接带入磨削区，可有效改善冷却条件；在砂轮上开槽还能起到风扇作用，可改善磨削过程散热条件。

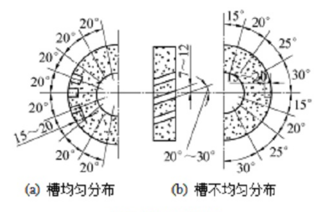


图 3.17　开槽砂轮

3.3.3　表面层残余应力

在机械加工过程中，当表层金属组织发生形状变化、体积变化或金相组织变化时，将在表面层的金属与其基体间产生相互平衡的残余应力。

1. 表层金属产生残余应力的原因

机械加工时在加工表面的金属层内有塑性变形产生，使表层金属的比容增大。由于塑性变形只在表面层中产生，而表面层金属的比容增大和体积膨胀，不可避免地要受到与它相连的里层金属的阻碍，这样就在表面层内产生了压缩残余应力，而在里层金属中产生拉伸残余应力。当刀具从被加工表面上切除金属时，表层金属的纤维被拉长，刀具后刀面与已加工表面的摩擦又加大了这种拉伸作用；刀具切离之后，拉伸弹性变形将逐渐恢复，而拉伸塑性变形则不能恢复，表面层金属的拉伸塑性变形，受到与它相连的里层未发生塑性变形金属的阻碍，因此就在表层金属中产生了压缩残余应力，而在里层金属中产生拉伸残余应力。

在机械加工中，切削区会产生大量的切削热，工件表面的温度往往很高。例如，在外圆磨削时，表层金属的平均温度达 300～400℃，而瞬时磨削温度则可高达 800～1200℃。图 3.18(a)所示为工件上温度分布示意图。t_p 点相当于金属具有高塑性的温度，温度高于 t_p 的表层金属不会有残余应力产生；t_n 为标准室温，t_m 为金属熔化温度。由图 3.18 所示温度分布图可知，表层金属 1 的温度超过 t_p，表层金属 1 处于没有残余应力作用的完全塑性状态中；金属层 2 的温度在 t_n 和 t_p 之间，这层金属受热之后体积要膨胀，由于表层金属 1 处于完全塑性状态，故它对金属层 2 的受热膨胀不起任何阻止作用；但金属层 2 的膨胀要受到处于室温状态的里层金属 3 的阻止，金属层 2 由于膨胀受阻将产生瞬时压缩残余应力，而金属层 3 则受到金属层 2 的牵连产生瞬时拉伸残余应力，如图 3.18(b)所示。切削过程结束之后，工件表面的温度开始下降，当金属层 1 的温度低于 t_p 时，金属层 1 将从完全塑性变形状态转变为不完全塑性状态，金属层 1 的冷却使其体积收缩，但它的收缩受到金属层 2 的阻碍，这样金属层 1 内就产生了拉伸残余应力，而在金属层 2 内的压缩残余应力将进一步增大，如图 3-18(c)所示。表层金属继续冷却，表层金属 1 继续收缩，它仍将受到里层金属的阻碍，因此金属层 1 的拉伸应力还要继续加大，而金属层 2 压缩应力则扩展到金属层 2 和金属层 3 内。在室温下，由于切削热引起的表层金属残余应力状态，如图 3.18(d)所示。

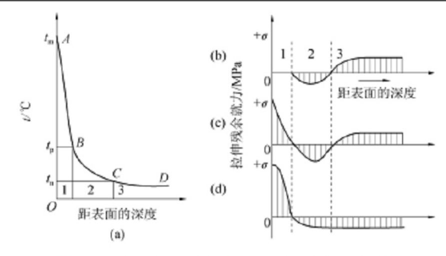


图 3.18　由于切削热在表层金属产生拉伸残余应力的示意

不同的金相组织具有不同的密度($\gamma_{马氏体}$=7.75t/m^3，$\gamma_{奥氏体}$=7.96t/m^3，$\gamma_{铁素体}$=7.88t/m^3，$\gamma_{珠光体}$=7.78t/m^3)，也就会具有不同的比容，如果在机械加工中，表层金属产生了金相组织的变化，表层金属的比容将随之发生变化，而表层金属的这种比容变化必然会受到与之相连的基体金属的阻碍，因此就会有残余应力产生。如果金相组织的变化引起表层金属的比容增大，则表层金属将产生压缩残余应力，而里层金属产生拉伸残余应力；若金相组织的变化引起表层金属的比容减小，则表层金属产生拉伸残余应力，而里层金属产生压缩残余应力。在磨削淬火钢时，因磨削热有可能使表层金属产生回火烧伤，工件表层金属组织将由马氏体转变为接近珠光体的托氏体或索氏体，表层金属密度从 7.75 t/m^3 增至 7.78 t/m^3，比容减小。表面层金属由于相变而产生的收缩受到基体金属的阻碍，因而在表层金属产生拉伸残余应力，里层金属则产生与之相平衡的压缩残余应力。如果磨削时表层金属的温度超过相变温度，且冷却又很充分，表层金属将因急冷形成淬火马氏体，密度减小，比容增大，那么，表面金属将产生压缩残余应力，而里层金属则产生拉伸残余应力。

2. 影响车削表层金属残余应力的工艺因素

1) 切削速度和被加工材料的影响

用正前角车刀加工 45 钢的切削试验结果表明，在所有的切削速度下，工件表层金属均产生拉伸残余应力，这说明切削热在切削过程中起主导作用。在同样的切削条件下加工 18CrNiMoA 钢时，表面残余应力状态就有很大变化。图 3.19 是车削 18CrNiMoA 钢工件的残余应力分布图。在采用正前角车刀以较低的切削速度(6～20m/min)车削 18CrNiMoA 钢时，工件表面产生拉伸残余应力；但随着切削速度的增大，拉伸应力值逐渐减小，在切削速度为 200～250m/min 时表面层呈现压缩残余应力，如图 3.19(a)所示。高速(500～850m/min)车削 18CrNiMoA 时，表面产生压缩残余应力，如图 3.19(b)所示，这说明在低速车削时，切削热的作用起主导作用，表层产生拉伸残余应力；随着切削速度的提高，表层温度逐渐提高至淬火温度，表层金属产生局部淬火，金属的比容开始增大，金相组织变化因素开始起作用，致使拉伸残余应力的数值逐渐减小。当高速切削时，表面金属的淬火进行得较充分，表面层金属的比容增大，金相组织变化起主导作用，因而在表层金属中产生了压缩残余应力。

2) 进给量的影响

加大进给量，会使表层金属的塑性变形增加，切削区发生的热量也将增大。加大进给量的结果，会使残余应力的数值及扩展深度均相应增大。

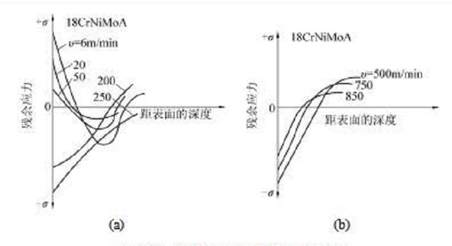


图 3.19　切削速度对残余应力的影响

3) 前角的影响

前角对表层金属残余应力的影响极大，图 3.20 是车刀前角对残余应力影响的试验曲线。以 150m/min 的切削速度车削 45 钢时，当前角由正值变为负值或继续增大负前角，拉伸残余应力的数值减小，如图 3.20(a)所示。当以 750m/min 的切削速度车削 45 钢时，前角的变化将引起残余应力性质的变化，刀具负前角很大(γ=−30° 和 γ=−50°)时，表层金属发生淬火反应，表层金属产生压缩残余应力，如图 3.20(b)所示。

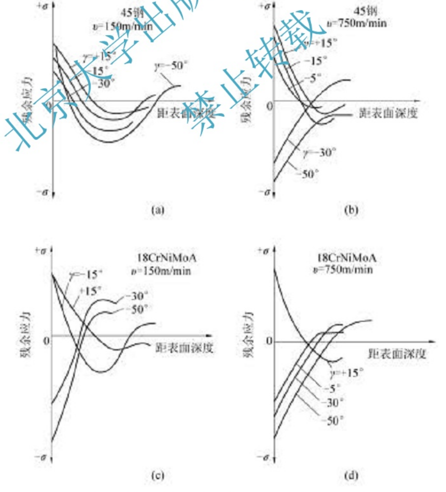


图 3.20　车刀前角对表层金属残余应力的影响

车削容易发生淬火反应的 18CrNiMoA 合金钢时，在 150m/min 的切削速度下；用前角 $\gamma=-30°$ 的车刀切削，就能使表面层产生压缩残余应力(图 3.20(c))；而当切削速度加大到 750m/min 时，用负前角车刀加工都会使表面层产生压缩残余应力；只有在采用较大的正前角车刀加工时，才会产生拉伸残余应力(图 3.20(d))。前角的变化不仅影响残余应力的数值和符号，而且在很大程度上影响残余应力的扩展深度。

此外，切削刃钝圆半径 r_n、刀具磨损状态等都对表层金属残余应力的性质及分布有影响。

3. 影响磨削残余应力的工艺因素

磨削加工中，塑性变形严重且产生的热量大，工件表面温度高，热因素和塑性变形对磨削表面残余应力的影响都很大。在一般磨削过程中，若热因素起主导作用，工件表面将产生拉伸残余应力；若塑性变形起主导作用，工件表面将产生压缩残余应力；当工件表面温度超过相变温度且又冷却充分时，工件表面出现淬火烧伤，此时金相组织变化因素起主要作用，工件表面将产生压缩残余应力。在精细磨削时，塑性变形起主导作用，工件表层金属产生压缩残余应力。

1) 磨削用量的影响

磨削背吃刀量 a_p 对表面层残余应力的性质、数值有很大影响。图 3.21 所示是磨削工业铁时，磨削背吃刀量对残余应力的影响。当磨削背吃刀量很小(例如 a_p =0.005mm)时，塑性变形起主要作用，因此磨削表面形成压缩残余应力。继续加大磨削背吃刀量，塑性变形加剧，磨削热随之增大，热因素的作用逐渐占主导地位，在表面层产生拉伸残余应力；且随着磨削背吃刀量的增大，拉伸残余应力的数值将逐渐增大。当 a_p >0.025mm 时，尽管磨削温度很高，但因工业铁的含碳量极低，不可能出现淬火现象，此时塑性变形因素逐渐起主导作用，表层金属的拉伸残余应力数值逐渐减小；当 a_p 取值很大时，表层金属呈现压缩残余应力状态。

提高砂轮速度，磨削区温度增高，而每颗磨粒所切除的金属厚度减小，此时热因素的作用增大，塑性变形因素的影响减小，因此提高砂轮速度将使表面金属产生拉伸残余应力的倾向增大。图 3.21 中，给出了高速磨削(曲线 2)和普通磨削(曲线 1)的试验结果对比。

增大工件的回转速度和进给速度，将使砂轮与工件热作用的时间缩短，热因素的影响逐渐减小，塑性变形因素的影响逐渐加大。这样，表层金属中产生拉伸残余应力的趋势逐渐减小，而产生压缩残余应力的趋势逐渐增大。

2) 工件材料的影响

一般来说，工件材料的强度越高、导热性越差、塑性越低，在磨削时表面金属产生拉伸残余应力的倾向就越大。碳素工具钢 T8 比工业铁强度高，材料的变形阻力大，磨削时发热量也大，且 T8 的导热性比工业铁差，磨削热容易集中在表面金属层，再加上 T8 的塑性低于工业铁，因此磨削碳素工具钢 T8 时，热因素的作用比磨削工业铁明显，表层金属产生拉伸残余应力的倾向比磨削工业铁大，如图 3.22 所示。

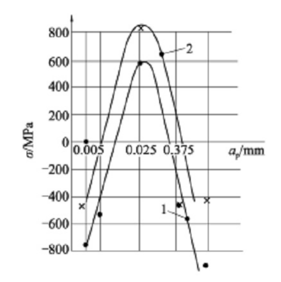


图 3.21 磨削背吃刀量对残余应力的影响

1—普通磨削 2—高速磨削

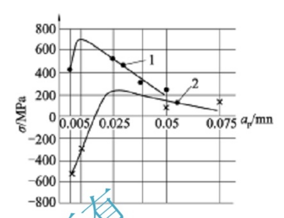


图 3.22 磨削 T8 钢时磨削背吃刀量对残余应力的影响

1—T8 磨削 2—工业铁磨削

4. 工件最终工序加工方法的选择

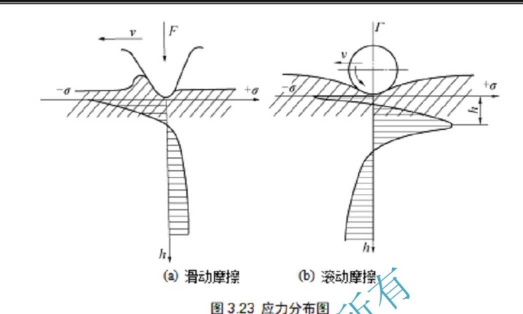
工件表层金属的残余应力将直接影响机器零件的使用性能。一般来说，工件表面残余应力的数值及性质主要取决于工件最终工序的加工方法，工件最终工序加工方法的选择至关重要。

如何选择工件最终工序的加工方法，需考虑该零件的具体工作条件及零件可能产生的破坏形式。

在交变载荷的作用下，机器零件表面上存在的局部微观裂纹，由于拉应力的作用使原生裂纹扩大，最后导致零件断裂。从提高零件抵抗疲劳破坏的角度考虑，最终工序应选择能在加工表面(尤其是应力集中区)产生压缩残余应力的加工方法。

两个零件作相对滑动，滑动面将逐渐产生磨损。滑动磨损的机理十分复杂，它既有滑动摩擦的机械作用，又有物理化学方面的综合作用(例如粘接磨损、扩散磨损、化学磨损)。滑动摩擦工作应力分布如图 3.23(a)所示，当表面层的压缩工作应力超过材料的许用应力时，将使表层金属磨损。从提高零件抵抗滑动摩擦引起的磨损考虑，最终工序应选择能在加工表面上产生拉伸残余应力的加工方法。从抵抗扩散磨损、化学磨损、粘接磨损考虑，对残余应力的性质无特殊要求，但残余应力的数值要小，使表面金属处于低能位状态。

两个零件做相对滚动，滚动面也将逐渐磨损。滚动磨损主要来自滚动摩擦的机械作用，也有来自粘接、扩散等物理、化学方面的综合作用。滚动摩擦工作应力分布如图 3.23(b)所示，引起滚动磨损的决定性因素是表面层下深度为 h 处的最大拉应力。从提高零件抵抗滚动摩擦引起的磨损考虑，最终工序应选择能在表面层下产生压应力的加工方法。



(a) 滑动摩擦　　(b) 滚动摩擦

图 3.23 应力分布图

各种加工方法在工件表面上残留的内应力情况，见表 3-3。此表可供选择最终工序加工方法。

表 3-3　各种加工方法在工件表面上残留的内应力

加工方法	残余应力符号	残余应力值 σ/MPa	残余应力层深度 h/mm
车削	一般情况下，表面受拉，里层受压；v_c=500m/min 时，表面受压，里层受拉	200～800，刀具磨损后达 1000	一般情况下，0.05～0.10；当用大负前角(γ=−30°)车刀，v_c很大时，h值可达 0.65
磨削	一般情况下，表面受压，里层受拉	200～1000	0.05～0.30
铣削	同车削	600～1500	
碳钢淬硬	表面受压，里层受拉	400～750	
钢珠滚压钢件	表层受压，里层受拉	700～800	
喷丸强化钢件	表面受压，里层受拉	1000～1200	
渗碳淬火	表层受压，里层受拉	1000～1100	
镀铬	表面受拉，里层受压	400	
镀铜	表面受拉，里层受压	200	

3.4　控制加工表面质量的措施

随着科学技术的发展，对零件的表面质量的要求已越来越高。为了获得合适零件，保证机器的使用性能，人们一直在研究控制和提高零件表面质量的途径。除前两节所介绍的一些有针对性的具体措施外，还有一些提高表面质量的工艺途径。

这些工艺途径可以大致分为两类：一类是用低效率、高成本的加工方法，寻求各工艺参数的优化组合，以减小表面粗糙度；另一类是着重改善工件表面的物理机械性能，以提高其表面质量。

3.4.1　采用精密加工和光整加工方法降低表面粗糙度

1. 精密和超精密加工工艺

精密加工工艺的加工精度主要由高精度的机床保证。精密加工的切削深度和进给量一般很小，切削速度则很高或极低，加工时尽可能进行充分的冷却润滑，以有利于最大限度地排除切削力、切削热对加工质量的影响，并有利于降低表面粗糙度。精密加工切削效率不高，故加工余量不能太大，所以对前道工序有较高的要求。

常用的精密和超精密加工方法有高速精镗、高速精车、宽刃精刨、细密磨削以及采用特定金刚石刀具的超精密切削、超精密磨削和特种加工方法等。

知识链接

精密、超精密加工工艺中遵循的原则如下。

1) 超微量切除的原则

任何工件的尺寸精度、几何形状精度和其表面粗糙度都有着极密切的关系，要想使工件达到 0.1 μm 以下的加工精度，通常其表面粗糙度 Ra 不大于 0.01 μm，即表面粗糙度要求必须比加工精度高，这就要求在选择加工方法时必须考虑到最后一道工序能从工件表面上除去小于或等于最后精度等级的表面层。

2) 预加工原则

在超精密加工中，最后一道工序除去的金属层厚度极薄，因此在预加工中必须保证工件的尺寸精度、几何形状精度和表面粗糙度都不应超出这一极薄的金属层的厚度范围，即预加工后零件尺寸偏差和表面粗糙度均应小于留给最后一道工序的余量。

3) 超级稳定的原则

机床—工具—工件系统及加工过程中产生的干扰，对超精密加工工件的尺寸精度、几何形状精度和表面粗糙度都有很大的影响。其中加工系统的弹性变形、热变形，以及工具同工件之间的振动位移是 3 个主要干扰因素。所以要消除机床内部的振动还要对来自机床外部的振源采取严格的防振与隔振措施，另外对环境的空气清洁度也要严格要求。

2. 光整加工工艺

当工件表面粗糙度要求小于 $Ra=0.1\mu m$ 时，往往要采用光整加工工艺，这不但在技术上易于实现，在经济上也较为合理。

光整加工技术要解决的核心问题是表面质量，有时也有生产率和加工精度要求，这是保证产品质量的基础和前提，也是实现从微米、亚微米加工技术向纳米级加工技术发展的重要途径。光整加工主要有采用固结磨料或游离磨料的手工研磨和抛光、机械(传统)光整加工、非传统光整加工和复合光整加工等。这里只简要介绍前两类方法。

手工方法研磨、抛光，能够实现平面、回转体、自由曲面的光整加工，适用于单件小批量生产。但这种方法劳动强度高，同时受到工人的技术等级和技术熟练程度的影响，质量不稳定，效率低。

机械光整加工是用粒度很细的磨料对工件表面进行微量切削和挤压、擦光的过程。机械光整加工是按照随机创制成形原理，加工中磨具与工件的相对运动尽可能复杂，尽可能

使磨料不走重复的轨迹，让工件加工表面各点都受到具有很大随机性的接触条件，以突出它们间的高点，进行相互修整，使误差逐步均化而得到消除，从而获得极光的表面和高于磨具原始精度的加工精度。

1) 珩磨

珩磨是利用珩磨头上的细粒度砂条对孔进行加工的方法，在大批量生产中应用很普遍。

2) 研磨

研磨是用研具以一定的相对滑动速度(粗研时取 0.67~0.83m/s，精研时取 0.1~0.2m/s)在 0.12~0.4MPa 压力下与被加工面作复杂相对运动的一种光整加工方法。

3) 抛光

抛光是在布轮、布盘或砂带等软的研具上涂以抛光膏来加工工件的。抛光器具高速旋转，由抛光膏的机械刮擦和化学作用将粗糙表面的峰顶去掉，从而使表面获得光泽镜面($Ra = 0.04 \sim 0.16\mu m$)。

知识链接

光整加工是指被加工对象表面质量得到大幅度提高的同时，实现精度的稳定甚至提高加工精度等级的一种技术，是先进制造技术的一个重要组成部分。

非传统光整加工主要包括离子束抛光、激光束抛光、化学抛光、电化学抛光、磁粒光整加工、磁流体研磨、磨料流抛光、超声波研磨与抛光、电泳研磨等方法。

复合非传统光整加工主要包括化学机械抛光、电化学超声波研磨、电火花超声波研磨、电化学机械光整加工、电火花电化学抛光、磁场电化学光整加工和其他复合光整加工等方法。

3.4.2　采用表面强化工艺改善表面层物理机械性能

表面强化工艺可分为机械强化工艺、激光表面处理工艺和渗氮、渗碳等化学热处理工艺等。这里所说的表面强化工艺是指通过冷压加工方法使表面层金属发生冷态塑性变形，以降低表面粗糙度值，提高表面硬度，并在表面层产生压缩残余应力的表面强化工艺。

1. 喷丸强化

喷丸强化是一种用压缩空气或离心力将大量直径细小的珠丸快速向零件表面喷射的方法。利用大量快速运动打击被加工工件表面，使工件表面产生冷硬层和压缩残余应力，可显著提高零件的疲劳强度和使用寿命。

珠丸可以是铸铁的，也可以是切成小段的钢丝(使用一段时间之后，自然变成球状)。对于铝质工件，为避免表面残留铁质微粒而引起电解腐蚀，宜采用铝丸或玻璃丸。珠丸的直径一般为 0.2~4mm，对于尺寸较小、表面粗糙度值要求较小的工件，采用直径较小的珠丸。

喷丸强化主要用于强化形状复杂或不宜用其他方法强化的工件，例如板弹簧、螺旋弹簧、连杆、齿轮、焊缝等。

喷丸后零件的使用寿命可提高数倍至数十倍。例如，齿轮可提高 4 倍，螺旋弹簧可提高 55 倍以上。

2. 滚压加工

滚压加工是利用经过淬硬和精细研磨过的滚轮或滚珠，在常温状态下对金属表面进行挤压，将表层的凸起部分向下压，凹下部分往上挤(图 3.24)，逐渐将前工序留下的波峰压平，从而修正工件表面的微观几何形状。此外，它还能使工件表面金属组织细化，形成压缩残余应力，图 3.25 为典型滚压加工示意图。

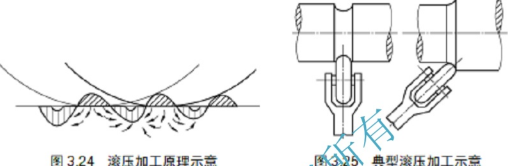


图 3.24　滚压加工原理示意　　图 3.25　典型滚压加工示意

滚压加工可降低表面粗糙度 3～5 级，表面硬度一般可提高 10%～40%，表层金属的耐疲劳强度一般可提高 30%～50%。

滚压强化常在车床上进行，精车后可直接在原机床上加装滚压工具进行滚压。适用于外圆、内孔或平面等规则表面的加工。

3. 液体磨料强化

液体磨料强化是用液体和磨料的混合物来强化零件表面的一种加工工艺。

图 3.26 所示为液体磨料喷射加工原理示意，液体和磨料在 400～800Pa 压力下，经过喷嘴高速喷出，射向工件表面，借磨粒的冲击作用，磨平工件表面粗糙度凸峰并碾压金属表面。由于磨料的冲击作用，工件表面层产生塑性变形，变形层仅为几十微米。加工后的工件表面层具有残余压应力，提高了工件的耐磨性、抗蚀性和疲劳强度。实践表明，与磨削加工的零件相比，经液性磨料喷射加工的零件的耐磨性可提高 25%～30%，疲劳强度可提高 15%～75%。这种加工工艺最适用于复杂型面加工，如锻模、汽轮机叶片、螺旋桨、仪表零件和切削刀具等。

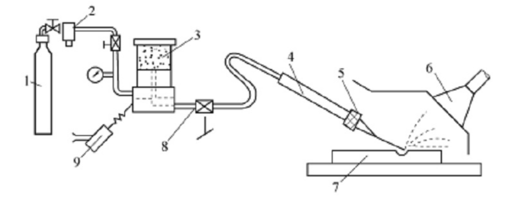


图 3.26　液体磨料喷射加工原理示意

1—压气瓶　2—过滤器　3—磨料室　4—导管　5—喷嘴
6—集收器　7—工件　8—控制阀　9—振动器

3.5　机械加工中的振动

一般说来，机械加工过程中的振动是一种十分有害的现象，它对于加工质量和生产效率都有很大影响，必须认真对待。在切削过程中发生振动时，加工表面将恶化，产生较明显的表面振痕。

3.5.1　机械加工中的振动现象及分类

1．机械加工中的振动现象及其对表面质量的影响

在机械加工过程中，工艺系统有时会发生振动(人为地利用振动来进行加工服务的振动车削、振动磨削、振动时效、超声波加工等除外)，即在刀具的切削刃与工件上正在切削的表面之间，除了名义上的切削运动之外，还会出现一种周期性的相对运动。这是一种破坏正常切削运动的极其有害的现象，主要表现在以下几个方面。

(1) 振动使得工艺系统的各种成形运动受到干扰和破坏，使得加工表面出现振纹，增大表面粗糙度值，恶化加工表面质量。

(2) 振动还可能引起刀刃崩裂，引起机床、夹具连接部分松动，缩短刀具及机床、夹具的使用寿命。

(3) 振动限制了切削用量的进一步提高，降低切削加工的生产效率，严重时甚至还会使得切削加工无法继续进行。

(4) 振动所发出的噪声会污染环境，危害工人的身心健康。

特别提示

研究机械加工过程中振动产生的机理，探讨如何提高工艺系统的抗振性和寻求可以用来消除振动的措施，一直是机械加工工艺学的重要课题之一。

2．机械加工中振动的基本类型及其主要特点

机械加工过程中产生的振动，按其性质可分为自由振动、强迫振动和自激振动 3 种基本类型。

1) 自由振动

当振动系统受到初始干扰力激励破坏了其平衡状态后，去掉激励或约束之后所出现的振动，称为自由振动。机械加工过程中的自由振动往往是由于切削力的突然变化或其他外界力的冲击等原因所引起的。这种振动一般可以迅速衰减，因此对机械加工过程的影响较小。

2) 强迫振动

机械加工中的强迫振动是由于外界(相对于切削过程而言)周期性干扰力的作用而引起的振动。强迫振动是影响精密加工质量和生产率的关键问题。磨削加工中主要会产生强迫振动。

3) 自激振动

机械加工过程中，在没有周期性外力(相对于切削过程而言)作用下，由系统内部激发反馈产生的周期性振动，称为自激振动。切削过程中产生的自激振动也称为颤振。切削加工中主要会产生自激振动。

机械加工中振动主要是强迫振动和自激振动。据统计，强迫振动约占 30%，自激振动约占 65%，自由振动所占比重则很小。

3.5.2　机械加工中的强迫振动

1. 机械加工中产生强迫振动的原因

强迫振动的振源有来自工艺系统内部的，称为内部振源；也有来自工艺系统外部的，称为外部振源。

外部振源很多，它们都是通过地基传给机床的，可以通过加设隔振地基加以消除。比如一台精密磨床和一台重型机床相邻，这台磨床就有可能受重型机床工作的影响而产生振动，影响其加工表面的粗糙度。

内部振源集中在机床、刀具、工件和加工过程等方面。

1) 机床方面

机床中某些传动零件的制造精度不高，机床运动零件的惯性力等会使得机床产生不均匀运动而引起振动。

例如机床中各种旋转零件(比如电动机转子、联轴节、带轮、离合器、轴、齿轮、卡盘、砂轮等)由于形状不对称、材质不均匀或加工误差、装配误差等原因，难免会有偏心质量产生。偏心质量引起的离心惯性力与旋转零件的转速的平方成正比，转速越高，产生周期性干扰力的幅值越大。

齿轮制造不精确或有安装误差会产生周期性干扰力。带传动中平带接头连接不良、V形带的厚度不均匀、轴承滚动体大小不一、链传动中由于链条运动的不均匀性等机床传动机构的缺陷所产生的动载荷都会引起强迫振动。

油泵排出的压力油，其流量和压力都是脉动的。由于液体压差及油液中混入空气而产生的空穴现象，会使机床加工系统产生振动。

在具有往复运动部件的机床中，最强烈的振源往往就是往复运动部件改变运动方向时所产生的惯性冲击。

2) 刀具方面

多刃、多齿刀具如铣刀、拉刀和滚刀等，切削时由于刃口高度的误差，容易产生振动。

3) 工件方面

被切削的工件表面上有断续表面或表面余量不均、硬度不一致等现象，这些都会在加工中产生振动。如车削或磨削有键槽的外圆表面就会产生强迫振动。

4) 加工过程方面

切削过程的不连续，将导致切削力的周期性改变，从而产生振动。如在铣削、拉削加工中刀齿在切入工件或从工件中切出时，都会有很大的冲击发生。加工断续表面也会发生由于周期冲击而引起的强迫振动。

2. 强迫振动的特点

机械加工中的强迫振动与一般机械振动中的强迫振动没有本质上的区别。

(1) 在机械加工中产生的强迫振动，其振动频率与干扰力的频率相同，或是干扰力频率的整数倍。此种频率对应关系是诊断机械加工中所产生的振动是否为强迫振动的主要依据，并可利用上述频率特征分析和查找强迫振动的振源。

(2) 强迫振动的幅值既与干扰力的幅值有关，又与工艺系统的动态特征有关。一般来说，在干扰力源频率不变的情况下，干扰力的幅值越大，强迫振动的幅值将随之增大。工

艺系统的动态特性对强迫振动的幅值影响极大。如果干扰力的频率远离工艺系统各阶模态的固有频率，则强迫振动响应将处于机床动态响应的衰减区，振动响应幅值就很小；当干扰力频率接近工艺系统某一固有频率时，强迫振动的幅值将明显增大；若干扰力频率与工艺系统某一固有频率相同，系统将产生共振。

(3) 在共振区，较小的频率变化会引起较大的振幅和相位角的变化。

(4) 强迫振动的稳态过程是谐振，只要干扰力存在，振动就不会被阻尼衰减掉，去除干扰力后，振动就会停止。

(5) 若工艺系统阻尼系数不大，振动响应幅值将十分大。阻尼越小，振幅越大，谐波响应轨迹的范围越大，增加阻尼能有效地减小振幅。

根据强迫振动的这些特点，可通过改变运动参数或工艺系统的结构，使干扰力源的频率发生变化或让工艺系统的某阶固有频率发生变化，使干扰力源的频率远离固有频率，强迫振动的幅值就会明显减小。

3.5.3　机械加工中的自激振动

1. 机械加工中产生自激振动的原因

由自激振动的概念可知，在自激振动中没有周期性外力的作用。既然没有周期性外力的作用，那么激发自激振动的交变力是怎样产生的呢？

用传递函数的概念来分析，机床加工系统是一个由振动系统和调节系统组成的闭环系统，如图 3.27 所示。激励机床系统产生振动运动的交变力是由切削过程产生的，而切削过程同时又受机床系统振动运动的控制，机床系统的振动运动一旦停止，动态切削力也就随之消失。如果切削过程很平稳，即使系统存在产生自激振动的条件，也因切削过程没有交变的动态切削力，使自激振动不可能产生。

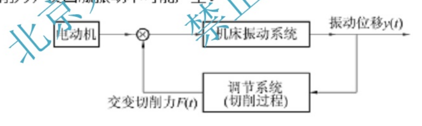


图 3.27　自激振动系统框图

但是，在实际加工过程中，偶然性的外界干扰(如工件材料硬度不均、加工余量有变化等)总是存在的，这种偶然性外界干扰所产生的切削力的变化，作用在机床系统上，会使系统产生振动运动；系统的振动运动将引起工件、刀具的相对位置发生周期性变化，使切削过程产生维持振动运动的动态切削力。如果工艺系统不存在产生自激振动的条件，这种偶然性的外界干扰，将因工艺系统存在阻尼而使振动运动逐渐衰减；如果工艺系统存在产生自激振动的条件，就会使机床加工系统产生持续的振动运动。维持自激振动的能量来自电动机，电动机通过动态切削过程把能量输给振动系统，以维持振动运动。

2. 自激振动的特点

与强迫振动相比，自激振动具有以下特征。

(1) 机械加工中的自激振动是在没有外力(相对于切削过程而言)干扰下所产生的振动运动，这与强迫振动有本质的区别。

(2) 自激振动的频率接近于系统的某一固有频率，或者说颤振频率取决于振动系统的固有特性。这一点与自由振动相似(但不相同)，而与强迫振动有根本不同，强迫振动的频率取决于外界干扰力的频率。

(3) 自由振动受阻尼作用将迅速衰减，而自激振动却不因有阻尼存在而迅速衰减。

3．自激振动的产生条件

实例分析 3-1

图 3.28 是一个最简单的单自由度机械加工振动模型。设工件系统为绝对刚体，振动系统与刀架相联，且只在 y 方向作单自由度振动。为分析简便，暂不考虑阻尼力的作用。

在径向切削力 F_y 的作用下，刀架向外作振出运动 $y_{\text{振出}}$，振动系统将有一个反向的弹性恢复力 $F_{\text{弹}}$ 作用在它上面。$y_{\text{振出}}$ 越大，$F_{\text{弹}}$ 也越大，当 $F_y = F_{\text{弹}}$ 时，刀架的振出运动停止(因为实际上振动系统中还是有阻尼力作用的)。在刀架作振出运动时，切屑相对于前刀面的相对滑动速度 $v_{\text{振出}} = v_0 - \dot{y}_{\text{振出}}$，其中 v_0 为切屑切离工件的速度。在刀架的振出运动停止时，切屑相对于前刀面的相对滑动速度 $v_{\text{停}} = v_0$，显然 $v_{\text{停}} > v_{\text{振出}}$。如果切削过程具有负摩擦特性，即速度越大，摩擦(力) $F(v)$ 越小，如图 3.29 所示；则在刀架停止振动的瞬间，其切削力 F_y 将比作振出运动时为小，此时呈现 $F_{\text{弹}} > F_y$ 的状态，于是刀架系统在 $F_{\text{弹}}$ 的作用下相对于被切工件作振入运动 $y_{\text{振入}}$。$y_{\text{振入}}$ 越大，$F_{\text{弹}}$ 就越小，当 $F_{\text{弹}} = F_y$ 时，刀架的振入运动停止(因为实际上振动系统中还是有阻尼力作用的)。在刀架作振入运动时，切屑相对于前刀面的相对滑动速度 $v_{\text{振入}} = v_0 + \dot{y}_{\text{振入}}$；而在刀架的振入运动停止时，$v_{\text{停}} = v_0$。在刀架停止振动的瞬间，切削力 F_y 将比作振入运动时大，此时 $F_y > F_{\text{弹}}$，刀架便在 F_y 作用下又开始作振出运动。综上分析可知，如果切削过程具有图 3.29 所示的负摩擦特性，图 3.28 所示单自由度系统将会有持续的自激振动产生。

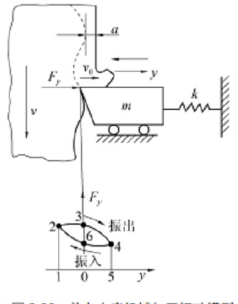


图 3.28　单自由度机械加工振动模型

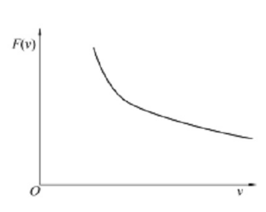


图 3.29　摩擦(力)特性图

从上述自激振动运动的分析实例可知，刀架的振出运动是在切削力 F_y 作用下产生的，对振动系统而言，F_y 是外力。在振出过程中，切削力 F_y 对振动系统作功，振动系统从切削过程中吸收了一部分能量($W_{振出}=W_{12345}$)，贮存在振动系统中，如图 3.28 所示。刀架的振入运动则是在弹性恢复力 $F_{弹}$ 作用下产生的，振入运动与切削力方向相反，振动系统对切削过程做功，即振动系统要消耗能量($W_{振入}=W_{54621}$)。

当 $W_{振出}< W_{振入}$时，由于振动系统吸收的能量小于消耗的能量，故不会有自激振动产生，加工系统是稳定的。即使振动系统内部原来就贮存一部分能量，在若干次振动之后，这部分能量也必将消耗殆尽，因此机械加工过程中不会有自激振动产生。

当 $W_{振出}= W_{振入}$时，由于在实际机械加工系统中必然存在阻尼，系统在振入过程中为克服阻尼尚需消耗能量 $W_{摩阻(振入)}$。由此可知，在每一个振动周期中振动系统从外界获得的能量：

$$\Delta W=W_{振出}-(W_{振入}+W_{摩阻(振入)})$$

若 $W_{振出}= W_{振入}$，则$\Delta W<0$，即振动系统每振动一次，系统便会损失一部分能量，系统也不会有自激振动产生，加工系统仍是稳定的。

当 $W_{振出}> W_{振入}$时，加工系统将有持续自激振动产生，加工系统处于不稳定状态。根据 $W_{振出}$与 $W_{振入}$的差值大小又可分为以下 3 种情况。

(1) 当 $W_{振出}=W_{振入}+W_{摩阻(振入)}$，加工系统有稳幅的自激振动产生。

(2) 当 $W_{振出}>W_{振入}+W_{摩阻(振入)}$，加工系统将有振幅递增的自激振动产生，振幅递增到一定程度出现新的能量平衡时，即 $W'_{振出}=W'_{振入}+W'_{摩阻(振入)}$时，加工系统才会有稳幅的自激振动产生。

(3) 当 $W_{振出}<W_{振入}+W_{摩阻(振入)}$，加工系统将有振幅递减的自激振动产生，振幅递减到一定程度出现新的能量平衡时，加工系统才会有稳幅的自激振动产生。

综上所述，加工系统产生自激振动的基本条件为 $W_{振出}> W_{振入}$，在力与位移的关系图中，要求振出过程曲线应位于振入过程曲线的上部，如图 3.30 所示。

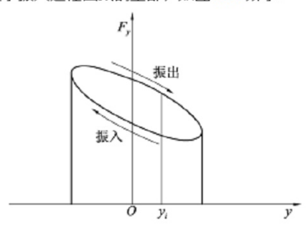


图 3.30 自激振动的产生条件

进一步分析图 3.30 所示曲线可知，产生自激振动的条件还可作如下描述：对于振动轨迹的任一指定位置 y_i 而言，振动系统在振出阶段通过 y_i点的力 $F_{振出(y_i)}$ 应大于在振入阶段通过同一点 y_i 的力 $F_{振入(y_i)}$。产生自激振动的条件还可归结为：$F_{振出(y_i)}>F_{振入(y_i)}$。

4．关于自激振动激振机理的几种学说

对于自激振动的激振机理，许多学者曾提出过许多不同的学说，得到较广泛认可的有再生原理、振型耦合原理、负摩擦原理和滞后原理。

1) 再生原理

切削或磨削加工中，由于刀具的进给量不大，后一次走刀和前一次走刀的切削区必然会有重叠部分，即产生重叠切削。如图 3.31 所示的外圆磨削，当砂轮的宽度为 B，工件每转进给量为 f，砂轮前一转的磨削区和后一转的磨削区便有重叠部分，其大小用重叠系数 μ 表示，即

$$\mu=(B-f)/B \qquad (0<\mu<1)$$

在切削加工中，如果前一转切削时，由于偶然的原因(如材料的硬点，加工余量不均匀或冲击等)，引起刀具和工件发生相对位移，加工表面上留下振纹。当工件转至下一转时，刀具在有波纹的表面上切削就有切削厚度的周期性改变。引起切削力的周期性改变，因而产生了振动。这个振动又影响下一转的切削，从而引起系统持续的再生颤振。

那么，在振动的一个周期内，能量是怎样输入振动系统的，可用图 3.32 所示的切削过程示意图进行说明。从图中看出，当后一转切削加工的工件表面 y (图中虚线)滞后于前一转切削的工件表面 y_0 (图中虚线)时，从 A 至 B 为振出(图中注为切出)，从 B 至 C 为振入(图中注为切入)，由于在振入工件的半个周期中的平均切削厚度比振出时的平均厚度小，切削力也小，则在一个振动周期中，切削力做的正功大于负功，有多余能量输入到系统中去，因而系统产生了再生颤振。如改变加工中某项工艺参数(如工件转速)，使 y 与 y_0 同相或超前一个相位角，则可以避免再生颤振。

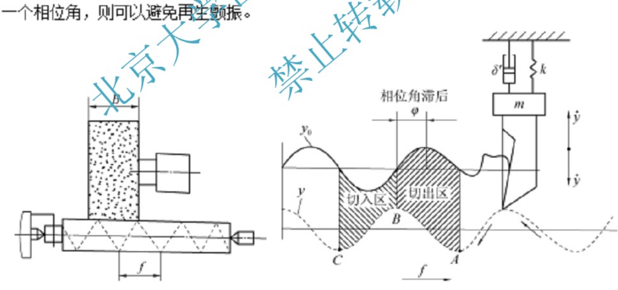


图 3.31 磨削时重叠磨削示意　　　图 3.32 再生颤振示意

2) 振型耦合原理

由上述可知，产生再生颤振的条件是刀具在有振纹的表面上切削。可是在加工如图 3.33 所示的方牙螺纹时，工件前后两转并未产生重叠切削，若按再生颤振学说，理应不产生自激振动，但在实际加工中，当背吃刀量增加到了一定的程度，切削过程仍有自激振动产生，其原因可用振型耦合原理来解释。

如图 3.34 所示，质量为 m 的刀具悬挂在两个刚度为 k_1 和 k_2 ($k_1<k_2$)的弹簧上，加工表

面的法向 y 与振型方位 x_1 和 x_2 的夹角分别为 α_1 和 α_2，动态切削力 F_d 和 y 方向的夹角为 β。F_d 以同一频率同时激起两个振型 x_1 和 x_2 的振动，因为 $k_1 \neq k_2$，它们的合成运动在 x_1 和 x_2 平面内的轨迹即为椭圆，椭圆的形状取决于系统的参数 k_1、k_2、α_1、α_2，以及两个振动方向的衰减系数 δ_1、δ_2 和激振力的频率 ω。改变上述参数或它们之间的比值就有可能改变系统的抗振性能。

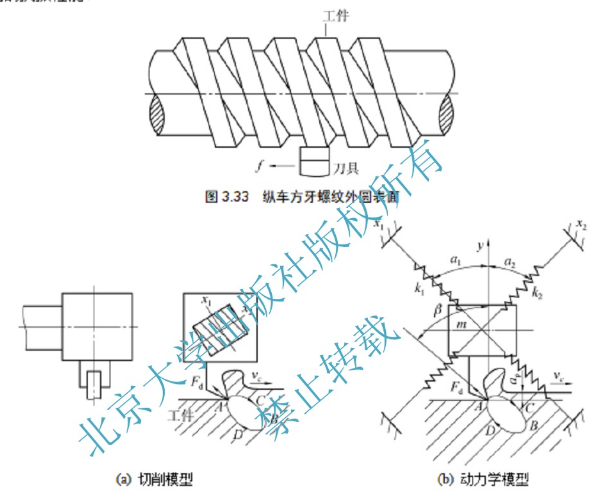


图 3.33　纵车方牙螺纹外圆表面

(a) 切削模型　　(b) 动力学模型

图 3.34　振型耦合原理示意

由图可知，若振动时刀尖相对于工件沿 ACB 的轨迹运动工件，这时运动方向与切削力方向相反，振动系统对外界做功，振动系统要消耗能量；当刀尖相对于工件沿 BDA 运动时，运动方向与切削力方向相同，外界对振动系统做功，振动系统吸收能量。由于刀尖相对于工件沿 ACB 方向运动时刀具的平均切削厚度小于刀尖相对于工件沿 BDA 方向运动时的平均切削厚度，故振动系统在每一个振动周期内，都将有一部分能量输入，满足产生自激振动的条件，有自激振动产生。这种由于振动系统在各主振模态间相互耦合、相互关联而产生的自激振动，称为振型耦合性颤振。

如果刀具和工件的相对运动轨迹沿着 ADB 切入，BCA 切出，显然，切削力做的负功大于正功，振动不能维持，原有的振动就会不断衰减下去。

实验表明，当小刚度方向 x_1 落在 β 角之内(即 $\alpha_1 < \beta$)为不稳定区。其中当 $\alpha_1 = \beta/2$ 时，稳定性最差，最易发生颤振。

3) 负摩擦原理

图 3.35 是在车床上用硬质合金车刀切削 45 钢试件所得到的试验曲线。由图可知，在

某些速度区段内切削力 F_y 随切削速度 v 的增加而减小，具有下降特征。

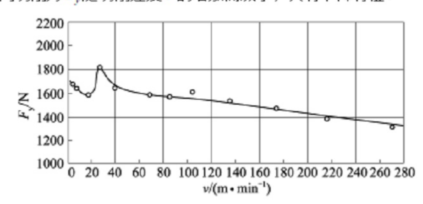


图 3.35　切削速度对切削力的影响

试件材料：45 钢(正火)；刀片材料：YT15；刀具几何形状：γ=18°，α=6°~8°，κ_r=10°~12°，λ_s=0°；切削用量：a_p=3mm，f=0.25mm/r

在切削力与切削速度具有下降特性的速度范围内，研究图 3.36(a)所示车床刀架在 y 方向上的振动运动。当刀架由于外界偶然干扰在 y 方向上作振动运动时，切屑相对刀具的相对运动速度($v_0-\dot{y}$)与振动位移 y 有如图 3.36(b)所示关系。对于刀具振动位移的任一指定位置 y_i 而言，刀具在振入阶段通过这一点时，切屑相对于刀具的相对速度总是大于振出阶段通过这一点的相对速度。因而，振出阶段的力总是大于振入阶段的力，即有 $F_{振出y_i} > F_{振入y_i}$，如图 3.36(c)所示，故加工系统有自激振动产生。这种由于切削过程中存在负摩擦特性而产生的自激振动，称为摩擦型颤振。

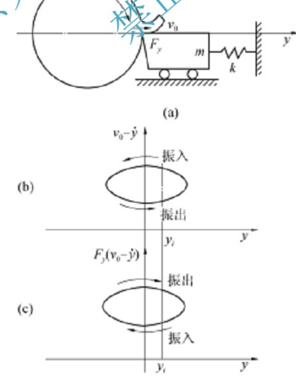
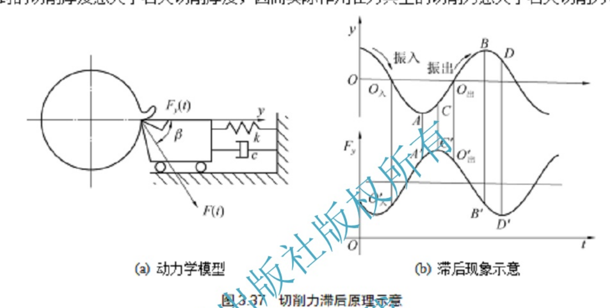


图 3.36　负摩擦激振原理示意

4) 切削力滞后原理

由于机床加工系统存在惯性与阻尼，因而实际作用在刀具上的切削力总是滞后于主振系统振动运动的。图 3.37 是切削动力学模型和滞后现象示意图。在振入过程中，名义切削厚度由小到大，但刀具实际感受到的切削厚度总小于名义切削厚度，因而实际作用在刀具上的切削力总小于名义切削力；而在振出过程中，名义切削厚度由大变小，刀具实际感受到的切削厚度总大于名义切削厚度，因而实际作用在刀具上的切削力总大于名义切削力。



(a) 动力学模型　　(b) 滞后现象示意

图 3.37　切削力滞后原理示意

将图 3.37 中 y 与 F_y 的关系画成图形可得图 3.38 所示的图形。对于刀具的任一切削位置 y_i，都将会有 $F_{振出y_i} > F_{振入y_i}$，故有自激振动产生。这种由于切削力滞后于振动运动的滞后效应所引起的自激振动，称为滞后型颤振。

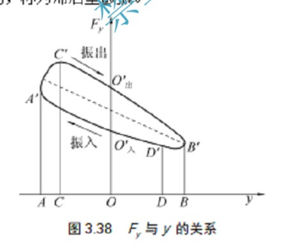


图 3.38　F_y 与 y 的关系

3.5.4　机械加工中振动的诊断技术

机械加工中产生的振动可分为强迫振动和自激振动(颤振)两大类。在自激振动中又可分为再生型、振型耦合型、摩擦型、滞后型等不同类型。从解决现场生产中发生的机械加工振动问题考虑，正确诊断机械加工振动的类别是十分重要的。一旦明确了现场生产中发生的振动主要是属于哪一类振动，便可有针对性地采取相应的减振、消振措施。

机械加工振动的诊断，主要包括两个方面的内容：一是首先要判定机械加工振动的类

别，要明确出哪些频率成分的振动属强迫振动，哪些频率成分的振动属自激振动；二是如果已知某个(或几个)频率成分的振动是自激振动，还要进一步判定它是属于哪一种类型的自激振动。

研究自激振动类别诊断技术的关键在于确定诊断参数。所确定的诊断参数必须是能够充分反映该类振动最本质、最核心的参数，同时还必须考虑实际测量的可能性。此处只介绍再生型颤振的诊断技术。

1．强迫振动的诊断

强迫振动的诊断任务，首先是判别机械加工中所发生的振动是否为强迫振动。若是强迫振动，尚需查明振源，以便采取措施加以消除。

1) 强迫振动的诊断依据

从强迫振动的产生原因和特征可知，强迫振动的频率与外界干扰力的频率相同(或是它的整倍数)。强迫振动与外界干扰力在频率方面的对应关系是诊断机械加工振动是否属于强迫振动的主要依据。可以采用频率分析方法，对实际加工中的振动频率成分，逐一进行诊断与判别。

2) 强迫振动的诊断方法和诊断步骤

(1) 采集加工现场的加工振动信号。在加工部位振动敏感方向，用传感器拾取机械加工过程的振动响应信号，经放大和A/D转换后输入计算机。

(2) 频谱分析处理。对所检测得到的振动信号作自功率谱密度函数处理，自谱图上各峰值点的频率即为机械加工的振动频率。自谱图上较为明显的峰值点有多少个，机械加工系统中的振动频率就有多少个；谱峰值最大的振动频率成分就是机械加工系统的主振频率成分。

(3) 做环境试验、查找机外振源。在机床处于完全停止的状态下，拾取振动信号、进行频谱分析。此时所得到的振动频率成分均为机外干扰力源的频率成分。然后将这些频率成分与机床加工时的振动频率成分进行对比，如两者完全相同，则可判定机械加工中产生的振动属于强迫振动，且干扰力源在机外环境中。如现场加工的主振频率成分与机外干扰力频率不一致，则需继续进行空运转试验。

(4) 做空运转试验、查找机内振源。机床按加工现场所用运动参数进行运转，但不对工件进行加工。采用相同的办法拾取振动信号，进行频谱分析，确定干扰力源的频率成分，并与机床加工时的振动频率成分进行对比。除已查明的机外干扰力源的频率成分之外，如两者完全相同，则可判定现场加工中产生的振动属受迫振动，且干扰力源在机床内部。如两者不完全相同，则可判断在现场加工的所有振动频率中，除去强迫振动的频率成分外，其余频率成分有可能是自激振动。

(5) 查找干扰力源。如果干扰力源在机床内部，还应查找其具体位置。可采用分别单独驱动机床各运动部件，进行空运转试验，查找振源的具体位置。但有些机床无法做到这一点，比如车床除可单独驱动电动机外，其余运动部件一般无法单独驱动，此时则需对所有可能成为振源的运动部件，根据运动参数(如传动系统中各轴的转速、齿轮齿数等)计算频率，并与机内振源的频率相对照，以确定机内振源位置。

2. 再生型颤振的诊断

1) 再生型颤振的诊断参数

再生型颤振是由切削厚度变化效应产生的动态切削力激起的，而切削厚度的变化则主要是由切削过程中被加工表面前、后两转(次)切削振纹相位上不同步引起的，相位差的存在是引起再生型颤振的根本原因。因此，可以用相位差作为诊断再生型颤振的诊断参数。

2) 相位差的测量与计算

由于颤振信号通常都是混频信号，且一般来说遗留在工件表面上的振痕并不是刀具、工件间相对振动的简单再现，因而要想直接测量工件表面上前后两转(次)切削振纹的相位差φ是不可能的。相位差φ可通过测量颤振频率f(Hz)及工件转速n(r/min)间接求得。

以车削为例，车削时工件每转一转的切削振痕数J为：

$$J = \frac{60f}{n} = J_z + J_\omega \tag{3-4}$$

式中 J_z——J中的整数部分；

J_ω——J中的小数部分。

相位差φ可通过J_ω间接求得：

$$\varphi = 360° \times (1 - J_\omega) \tag{3-5}$$

对式(3-5)进行全微分、增量代换及取绝对值，可得相位差φ的测量误差为：

$$|\Delta\varphi| \leqslant \frac{21600°}{n^2}(f|\Delta n| + n|\Delta f|) \tag{3-6}$$

式中 Δn——工件转速的测量误差；

Δf——颤振频率的测量误差。

如果测量误差$\Delta\varphi$的要求一定，由式(3-6)可计算确定转速n和颤振频率f的测量精度，如是测量误差Δn及Δf已确定，也可通过该式来估计相位差φ的测量误差。

为避免错判现象发生，相位差φ的测量误差应不大于10°。在通常的机床结构及常用的切削参数条件下，若满足$|\Delta\varphi| \leqslant 10°$的要求，应使工件转速的测量误差$|\Delta n| \leqslant 0.01$r/min；频谱处理中颤振频率$f$的频率分辨率应达到$|\Delta f| \leqslant 0.02$Hz。

一般来说，较高的转速测量精度比较容易获得，但采用通常的频谱分析技术，其频率分辨率是无法达到0.02Hz的。为获得较高的频率分辨率，在再生型颤振的诊断中，需采用频率细化技术。

知识链接

频率细化技术是20世纪70年代发展起来的一种重要的频谱分析手段，进行频率细化分析的主要目的在于提高频谱的分辨力，得到比一般频谱分析更加详尽的频率成分信息，或者更为准确的频率、幅值和相位信息。常用的频率细化技术有连续离散傅里叶变换频率细化和复调制频率细化等。

在诊断过程中，振动信号的拾取与工件转速的测量应同步进行。由经频率细化处理所得颤振频率f和切削时实际测得的工件转速n，通过式(3-4)和式(3-5)即可求得相位差φ。

3) 再生型颤振的诊断要领

如果加工过程中发生了强烈振动，可设法测得被加工工件前、后两转(次)振纹的相位差φ。若相位差φ位于Ⅰ象限、Ⅱ象限内，即$0° < \varphi < 180°$，则可判定加工过程中有再生型颤振产生；若相位差φ位于Ⅲ象限、Ⅳ象限内，即$180° < \varphi < 360°$，则可判定加工过程中产生的振动不是再生型颤振。

3.5.5 消减机械加工中振动的途径

消减振动的途径主要有 3 个方面：消除或减弱产生机械加工振动的条件；改善工艺系统的动态特性，提高工艺系统的稳定性；采用各种消振减振装置。

1. 消除或减弱产生强迫振动的条件

1) 减小机内外干扰力的幅值

高速旋转零件必须进行平衡，例如磨床的砂轮、车床的卡盘及高速旋转的齿轮等。尽量减少传动机构的缺陷，设法提高带传动、链传动、齿轮传动及其他传动装置的稳定性。对于高精度机床，应尽量少用或不用齿轮、平带等可能成为振源的传动元件，并使动力源(尤其是液压系统)与机床本体分离，放在另一个地基基础上。对于往复运动部件，应采用较平稳的换向机构。在条件允许的情况下，适当降低换向速度及减小往复运动件的质量，以减小惯性力。

2) 适当调整振源的频率

在选择转速时，使可能引起强迫振动的振源频率f远离机床加工系统薄弱模态的固有频率f_n，一般应满足：

$$\left|\frac{f_n - f}{f}\right| \geqslant 0.25 \tag{3-7}$$

3) 采取隔振措施

隔振有两种方式，一种是主动隔振，以阻止机床振源通过地基外传；另一种是被动隔振，阻止机外干扰力通过地基传给机床。常用的隔振材料有橡皮、金属弹簧、空气弹簧、泡沫乳胶、软木、矿渣棉、木屑等。中小型机床多用橡皮衬垫，而重型机床多用金属弹簧或空气弹簧。

2. 消除或减弱产生自激振动的条件

1) 减小前后两转(次)切削的波纹重叠系数

再生型颤振是由于在有波纹的表面上进行切削引起的，如果本转(次)切削不与前转(次)切削振纹相重叠，就不会有再生型颤振产生。图 3.39 中的ED是上转(次)切削留下的带有振纹的切削宽度，AB是本转(次)的切削宽度，前后两转(次)切削波纹的重叠系数：

$$\mu = \frac{CD}{AB} = \frac{ED - EC}{AB} = 1 - \frac{\sin\kappa_r \sin\kappa_r'}{\sin(\kappa_r + \kappa_r')} \times \frac{f}{a_p} \tag{3-8}$$

重叠系数μ越小，就越不容易产生再生型颤振。重叠系数μ的数值取决于加工方式、刀具的几何形状及切削用量等，增大刀具的主偏角κ_r、增大进给量f，均可使重叠系数μ减小。在外圆切削时，采用κ_r=90°的车刀，可有明显的减振作用。

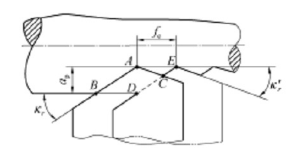
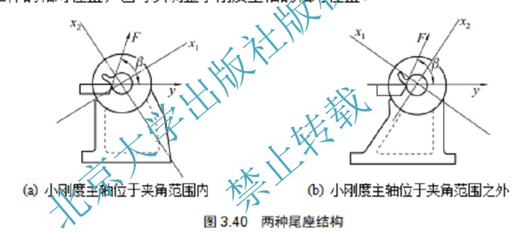


图 3.39　重叠系数 μ 计算图

2) 调整振动系统小刚度主轴的位置

理论分析和实验结果均表明，振动系统小刚度主轴 x_1 相对于 y 坐标轴的夹角 α (如图 3.34 所示)对振动系统的稳定性具有重要影响。当 α 位于切削力 F 与 y 坐标轴的夹角 β 内时，机床加工系统就会有振型耦合型颤振产生。图 3.40(a)所示尾座结构小刚度主轴 x_1 位于切削力 F 与 y 轴的夹角 β 范围内，容易产生振型耦合型颤振；图 3.40(b)所示尾座结构较好，小刚度主轴 x_1 位于切削力 F 与 y 轴的夹角 β 范围之外。除改进机床结构设计之外，合理安排刀具与工件的相对位置，也可以调整小刚度主轴的相对位置。



(a) 小刚度主轴位于夹角范围内　　(b) 小刚度主轴位于夹角范围之外

图 3.40　两种尾座结构

x_1 —小刚度主轴　x_2 —大刚度主轴

3) 增加切削阻尼

适当减小刀具后角，可以加大工件和刀具后刀面之间的摩擦阻尼，对提高切削稳定性有利。但刀具后角过小会引起摩擦型颤振，一般后角取 2°~3°为宜，必要时还可在后刀面上磨出带有负后角的消振棱，如图 3.41 所示。如果加工系统产生摩擦型颤振，需设法调整转速，使切削速度 v 处于 $F-v$ 曲线中下降至特性区之外的位置。

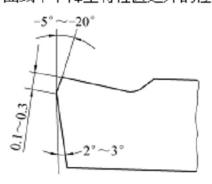


图 3.41　车刀消振棱

4) 采用变速切削方法加工

再生型颤振是切削颤振的主要形态，变速切削对于再生型颤振具有显著的抑制作用。所谓变速切削就是人为地以各种方式连续改变机床主轴转速所进行的一种切削方式。在变速切削中，机床主轴转速将以一定的变速幅度 $\Delta n/n_0$、一定的变速频率、一定的变速波形围绕某一基本转速 n_0 作周期变化。图 3.42 是变速切削减振原理图。图 3.42(a)为再生型颤振的稳定性极限图，图中的阴影部分为不稳定区，其余部分为稳定区。图 3.42(b)为变速切削时颤振频率 f 随机床主轴转速 n 的变化图。

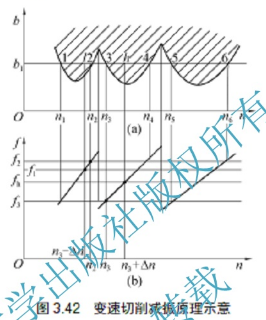


图 3.42　变速切削减振原理示意

变速切削的减振机理可归结为以下两点：①采用变速切削方法加工时，只要变速幅度 Δn 足够大，切削过程将在不稳定区与条件稳定区内交替进行(图 3.42(a))。当切削加工在条件稳定区进行时，从理论上说，加工系统的振动响应趋近于零，这是变速切削具有减振作用的直接原因。②在变速切削时，振动频率随机床主轴转速变化近似呈分段线性锯齿状变化，如图 3.42(b)所示。变速切削过程中，机床加工系统的振动频率随着机床主轴转速变动而变动，变速切削系统的振动响应是变频激励的瞬间响应，与恒频激励相比，变频激励的振动响应要小，这是变速切削之所以具有减振作用的更为本质的原因。

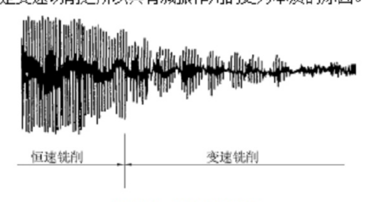


图 3.43　铣削振动波形

实验条件 工件材料：45 钢；刀具：ϕ 200mm 镶齿不重磨铣刀(YT14)；

切削用量：a_p=0.5mm，n_0=70r/min，f=37.5mm/min；

变速幅度 $\Delta n/n_0=\pm15\%$；变速频率为 0.3Hz；变速波形为正弦波

一般来说，只要变速参数选择合适，采用变速切削可使振幅降至恒速切削时的 10%～20%。图 3.43 是在立式铣床一次进给中由恒速铣削直接转变为变速铣削时所测得的振动波形图。由图可以看出，变速切削具有十分明显的减振效果。

3．改善工艺系统的动态特性、提高稳定性

1) 提高工艺系统刚度

提高工艺系统的刚度，可以有效地改善工艺系统的抗振性和稳定性。在增强工艺系统刚度的同时，应尽量减小构件自身的质量。应把“以最轻的质量获得最大的刚度”作为结构设计的一个重要原则。

2) 增大工艺系统的阻尼

工艺系统的阻尼主要来自零部件材料的内阻尼、结合面上的摩擦阻尼及其他附加阻尼等。材料的内阻尼是指由材料的内摩擦而产生的阻尼，不同材料的内阻尼是不同的。由于铸铁的内阻尼比钢大，所以机床上的床身，立柱等大型支承件常用铸铁制造。除了选用内阻尼较大的材料制造外，还可以把高阻尼材料附加到零件上，如图 3.44 所示。

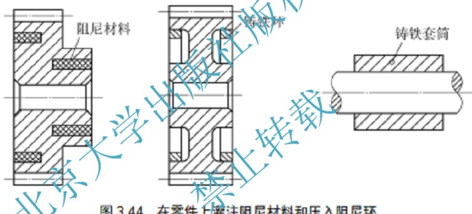


图 3.44　在零件上灌注阻尼材料和压入阻尼环

机床阻尼大多来自零部件结合面间的摩擦阻尼，有时它可占总阻尼的 90%，应通过各种途径加大结合面间的摩擦阻尼。对于机床的活动结合面，应当注意调整其间隙，必要时可施加预紧力以增大摩擦力。试验证明，滚动轴承在无预加载荷作用有间隙的情况下工作，其阻尼比为 0.01～0.02；当有预加载荷而无间隙时，阻尼比可提高到 0.02～0.03。对于机床的固定结合面，要求选择合理加工方法、合适的表面粗糙度等级，还要求选择恰当的结合面固定方式，确定合适的结合面上的比压。

4．采用各种消振减振装置

如果不能从根本上消除产生切削振动的条件，又无法有效地提高工艺系统的动态特性，为保证必要的加工质量和生产率，可以采用消振减振装置。常用的减振器有以下 3 种类型。

1) 动力减振器

动力减振器是弹性元件 k_2 将一个附加质量 m_2 联接到主振系统 m_1、k_1 上(如图 3.45 所示)，利用附加质量的动力作用，使其加到主振系统上的作用力(或力矩)与激振力(或力矩)大小相等、方向相反，从而达到抑制主振系统振动的目的。

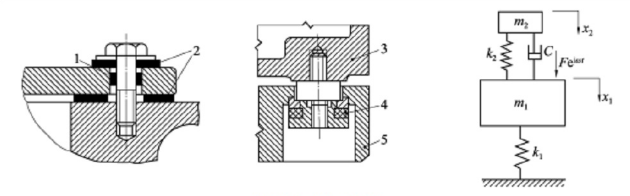


图 3.45　动力减振器

1—橡胶圈　2—橡胶垫　3—机床 m_1　4—弹簧阻尼元件　5—附加质量 m_2

2) 摩擦减振器

摩擦减振器是利用摩擦阻尼来消散振动能量。图 3.46 是一个装在车床尾座上的摩擦减振器，它是靠填料圈的摩擦阻尼来减小振动的。

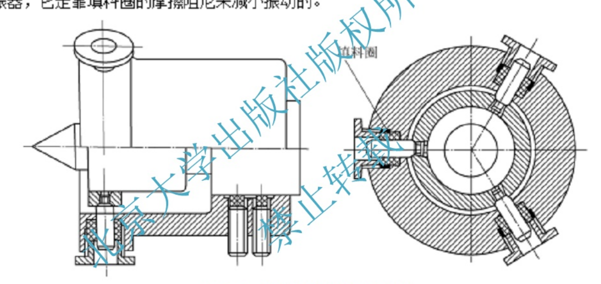


图 3.46　车床尾座上的摩擦减振器

3) 冲击式减振器

冲击式减振器是利用两物体相互碰撞要损失动能的原理，在振动体 M 上装有一个起冲击作用的自由质量(冲击块)m。系统振动时，自由质量将反复冲击振动体，以消散振动能量，达到减振的目的。图 3.47 是冲击式减振器的典型结构及动力学模型。为了获得最有利的碰撞条件，要求振动体 M 和冲击块 m 都能以其最大速度运动时发生相互碰撞，这样才能得到最大的动能损耗。间隙 δ 的大小对减振效果影响甚大，为获得最佳减振效果，间隙 δ 应满足：

$$\delta = \frac{T}{2}\dot{x}_{max} = \frac{\pi}{\omega}A\omega = \pi A \tag{3-8}$$

式中　T——振动体 M 的振动周期；

　　A——振动体 M 的振幅。

需要特别指出的是，式(3-8)中的幅值 A 是一个变值，当振动体 M 的振幅值 A 逐渐减小时，要求间隙值 δ 应随之减小，这样才能取得最佳减振效果。除了间隙值之外，冲击块的材料选择也很重要，应选密度大、弹性恢复系数大的材料(例如淬硬钢或硬质合金)制造冲击块；必要时也可将冲击块挖空，内部注入密度比较大的铅以增加其质量。

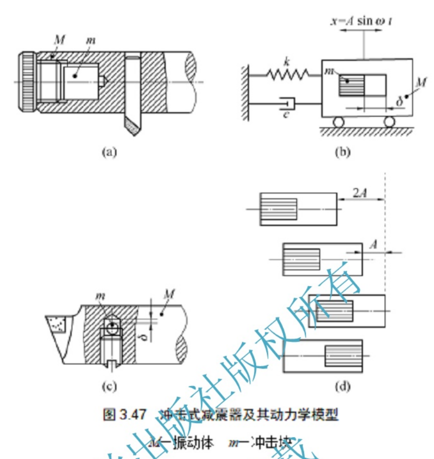


图 3.47　冲击式减震器及其动力学模型

M—振动体　m—冲击块

冲击式减振器具有结构简单、重量轻、体积小、减振效果好等优点，可以在较大的振动频率范围内使用。

本 章 小 结

本章围绕机械加工中各种工艺因素对加工表面质量影响的规律进行了系统的阐述，并在此基础上介绍了控制机械加工表面质量的对应措施和常用方法。

用来描述机械加工表面质量的指标主要包括加工表面的几何形状误差和表面层材质的物理机械性能。前者又包括表面粗糙度、波度、纹理方向和表面缺陷等；后者又包括表面层冷作硬化、表面层金相组织变化、表面残余应力等。表面质量对零件的耐磨性、耐疲劳性、耐蚀性、零件配合质量及其他使用性能有很大的影响。

表面粗糙度是在机械加工过程中所产生的，影响加工表面粗糙度的工艺因素主要有几何因素和物理因素两个方面。不同的加工方式，影响加工表面粗糙度的工艺因素各不相同。

引起表面层物理机械性能变化的因素较多，在车削加工和磨削加工中的因素也有所不同。针对具体的因素可以采取相对应的措施进行控制。

常用的控制加工表面质量的措施包括采用精密加工和光整加工方法降低表面粗糙度以及采用表面强化工艺改善表面层物理机械性能等。

机械加工中的振动对工件的表面质量有多方面的影响，根据振动的性质可分为

自由振动、强迫振动和自激振动 3 种类型，其中对加工过程影响更大的是后两者。强迫振动和自激振动都有其各自的产生原因和特点。自激振动的产生需要满足 $W_{振出} > W_{振入}$ 的条件。为了有效地控制振动，需要对机械加工中的振动进行正确的诊断。消减振动的途径主要有 3 个方面：消除或减弱产生机械加工振动的条件；改善工艺系统的动态特性，提高工艺系统的稳定性；采用各种消振减振装置。

习　　题

(1) 机器零件的表面质量包括哪些方面的内容？为什么说零件的表面质量与加工精度对保证机器的工作性能来说具有同等重要的意义？

(2) 机械加工表面质量对零件的使用性能有哪些影响？

(3) 切削加工后的表面粗糙度由哪些因素造成？要使粗糙度变小，对各种因素应如何加以控制？

(4) 车削一铸铁零件的外圆表面，若进给量 f=0.40mm/r，车刀刀尖圆弧半径 r_{ε}=3mm，试估算车削后表面粗糙度的数值。

(5) 为什么提高砂轮速度能降低磨削表面的粗糙度数值，而提高工件速度却得到相反的结果？

(6) 为什么在切削加工中一般都会产生冷作硬化现象？

(7) 为什么磨削高合金钢比普通碳钢容易产生烧伤现象？

(8) 机械加工中，为什么工件表面层金属会产生残余应力？磨削加工工件表面层产生残余应力的原因与切削加工产生残余应力的原因是否相同？为什么？

(9) 加工表面产生压缩残余应力的原因是什么？加工表面产生拉伸残余应力的原因是什么？

(10) 什么是强迫振动？它与自由振动有何区别？减小强迫振动的基本途径有哪些？

(11) 什么是自激振动？它与强迫振动有何区别？目前关于自激振动的学说有哪些？其要点是什么？通过哪些措施可以抑制自激振动？

(12) 在安装在防振地基上的车床或外圆磨床上，车削或磨削一根刚度较大的轴时，发现工件加工表面上有振纹。如何判断振动是由强迫振动引起的还是由自激振动引起的？如果是由强迫振动引起的，如何判断振源在哪里？

(13) 图 3.48(a)所示为车削薄壁筒时，筒内灌水、油或砂；图 3.48(b)所示为床身零件铸好后把泥芯砂仍保留在床身腔窝内。这样做有何好处？为什么？

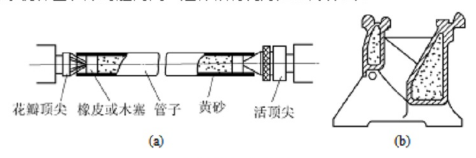


图 3.48　题 13 图

(14) 试分析比较下列刀具结构中哪一种对减振有利？刚性车刀和弹性车刀，如图 3.49(a)、(b)所示；直杆刨刀和弯头刨刀，如图 3.49(c)、(d)所示，为什么？

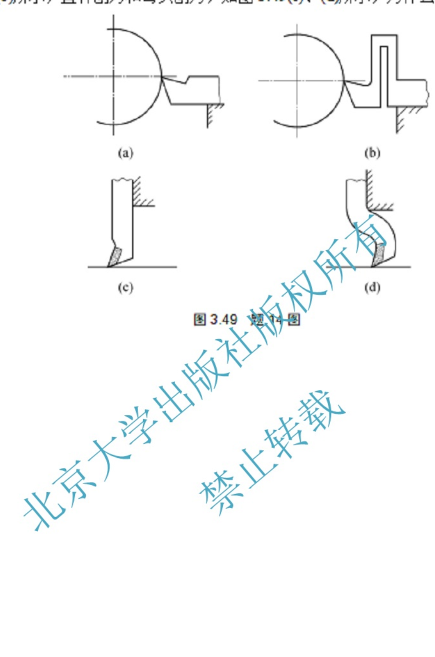


图 3.49 题 14 图

第 4 章　提高劳动生产率的途径

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握提高劳动生产率的工艺措施	缩短基本时间，辅助时间，服务时间，准备时间的方法	20%	
掌握成组技术的基本原理	成组技术的基本原理	5%	
了解零件分类编码系统	德国的 OPITZ(奥匹兹)分类编码系统、JLBM-1 分类编码系统	10%	
掌握零件分类成组方法	生产流程分析法、编码分类法	10%	
了解成组工艺过程的制订	复合零件法、复合路线法	5%	
了解 CAPP 的组成	输入模块、工艺规程设计模块、数控加工指令生成与加工过程动态仿真模块、输出模块、修改模块、控制模块、各类库存信息	15%	
了解 CAPP 的类型	检索式、派生式、创成式、智能型及综合式 CAPP 系统	20%	
了解计算机辅助制造	计算机在辅助制造中的应用	5%	
了解计算机集成制造系统	计算机集成制造系统的结构、组成	5%	
了解柔性制造系统的构成	加工、物流及信息子系统	5%	

引例


汽车装配流水线

1913 年，美国福特汽车公司创立第一条汽车生产流水线。通过大规模的生产流水线，以标准化、大批量生产降低了生产成本，提高了生产效率。大规模的生产流水线一直是现代工业生产的主要特征。大规模生产方式是以标准化、大批量生产来降低生产成本，提高生产效率的。汽车生产流水线的产生，一举把汽车从少数富翁的奢侈品变成了大众化的交通工具，美国汽车工业也由此迅速成长为美国的一大支柱产业，并带动和促进了包括钢铁、玻璃、橡胶、机电以至交通服务业等在内的一大批产业的发展。大规模流水生产在生产技术以及生产管理史上具有极为重要的意义。但是第二次世界大战以后，社会进入了一个市场需求向多样化发展的新阶段，相应地要求工业生产向多品种、小批量的方向发展，单品种、大批量的流水生产方式的弱点就日渐明显了。为了顺应这样的时代要求，近几十年出现了许多先进机械制造技术和方法，显著提高了劳动生产率，除成组技术、计算机辅助工艺规程设计外，还有计算机辅助制造、计算机集成制造系统、柔性制造系统等。

4.1　提高生产率的措施

劳动生产率是衡量生产效率的一个综合性指标，是在单位时间内生产出合格产品的数量。生产单件产品所需的时间越少，单位时间内的产量越高。

4.1.1　提高生产率的工艺措施

缩减时间定额就可以提高生产率。针对单件时间定额的组成因素，采取工艺措施，特别是缩短工时定额中所占比重较大的因素，是提高生产率的有力措施。

特别提示

在大量、大批生产中，基本时间所占比重较大，而在单件与小批生产中，辅助时间和准备终结时间占的比重较大。

1. 缩短基本时间

1) 增大切削用量，缩短基本时间

由基本时间的计算公式可知，提高切削速度、增大进给量和切削深度都可以缩短基本时间。目前，硬质合金刀具的切削速度已可达到 200m/min 左右，陶瓷车刀则可达到 500m/min 左右。近年来，国内外还采用聚晶金刚石和聚晶立方氮化硼的切削刀具，在切削普通碳钢时，切削速度可达到 900～1000m/min 之间。在加工高硬度材料时，如 HRC60 以上的淬火钢以及难加工材料(如高温合金)时，切削速度可达到 90～100m/min 之间，并能在 900～1000℃时仍能保持其红脆性。在磨削方面，磨削速度一般可达 60～90m/min，在实验室中可以完成 200m/min 的超高速磨削。加大进给量和切削深度，进行强力车削和强力磨削是提高劳动生产率的有效途径。

2) 减小加工余量，缩短基本时间

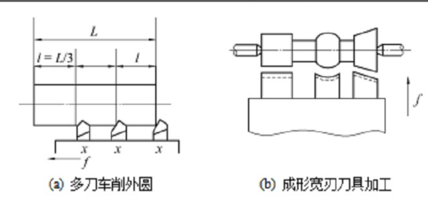
提高毛坯质量，减少加工余量，对提高劳动生产率有着非常重要的作用。因此，改进毛坯制造方法，使毛坯最大限度的接近成品，是缩短基本时间十分有效的办法之一。

目前，精密铸造和精密锻造可使加工余量大大减少。如压力机叶片的叶型，采用精锻、精压和辗压等方法，能制造出无余量叶型，不但能保证精度，而且粗糙度 Ra 也在 1.6～0.4μm 之间。又如，轴类零件采用空心锻造，可大大减少孔深加工的劳动量。环形件采用弯曲焊接、扩径辗压的方法，也大大地减少了机械加工的时间。

3) 缩短刀具的工作行程长度，缩短基本时间

用多刀或复合刀具加工，以减少切入切出的长度，或使工作行程部分或全部重合，从而减少基本时间。

例如，图 4.1(a)所示为多刀车削外圆，每把刀具的切削行程长度是工作行程长度的 1/3，图 4.1(b)所示为成形宽刃刀具加工，图 4.2 为多刀铣削箱体的加工，它们都可使切削行程重合，缩短基本时间。



(a) 多刀车削外圆　　　　　　(b) 成形宽刃刀具加工

图 4.1　减少或重合切削行程长度的方法

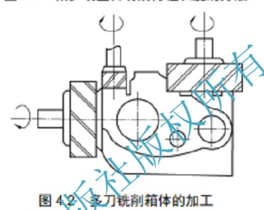


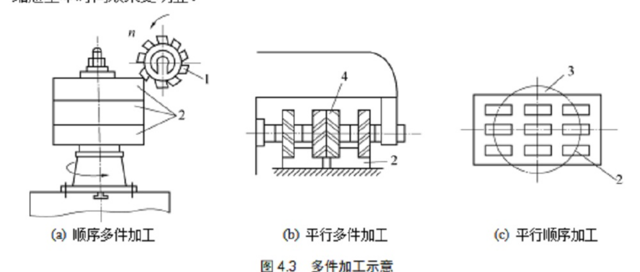
图 4.2　多刀铣削箱体的加工

4) 采用多件加工，缩短基本时间

(1) 顺序多件加工，如图 4.3(a)所示滚齿加工中，工件按走刀方向顺序地装夹并加工，这样可以缩减刀具的切入和切出时间，从而提高生产率。

(2) 平行多件加工，如图 4.3(b)所示铣削等加工中，工件平行排列，一次走刀可以同时加工 n 个工件，而每个工件的基本时间只是原来的 $1/n$。

(3) 平行顺序加工，如图 4.3(c)所示平面磨削中，这是上述两种形式的综合，这种情况缩短基本时间效果更明显。



(a) 顺序多件加工　　　　(b) 平行多件加工　　　　(c) 平行顺序加工

图 4.3　多件加工示意

1—滚刀　2—工件　3—砂轮　4—铣刀

2. 缩短辅助时间

辅助时间有时在整个工时定额中占的比重较大，尤其是在中、小批量生产时。在这种情况下，缩短辅助时间就有着重要意义。

1) 直接缩短辅助时间

在辅助时间中，大部分时间用在工件的装、卸上。

采用高效率的先进夹具，使用快速和多位夹紧装置，可大大节省工件的装卸及找正时间。所以，在大量、大批生产时，经常采用气动、液动及电磁等快速夹具。在中、小批生产中，则常采用组合夹具或其他可调整和拼装的夹具，以及成组工艺中采用的成组夹具等。另外，采用主动测量装置和数字显示装置可以有效地减少加工过程中的测量时间。

2) 使辅助时间与基本时间重合

在工件进行切削加工的过程中完成各种辅助动作，可使辅助时间大大减少。例如，采用双工位或多工位回转夹具、回转工作台、多工位组合机床、专用机床和双工作台的加工中心等，多可使装卸工件的时间和基本时间重合。如图 4.4 所示为立式铣床上采用双工位夹具的示意图，加工工件 2 时，工人在工作台另一端取下加工完的工件并装上新的工件。工件 2 加工完毕后，工作台快速退回原位，工人将工作台回转 180° 度即可加工另一工件。

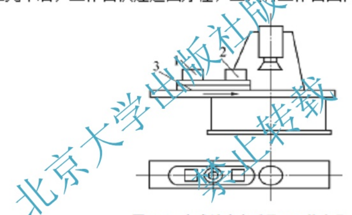


图 4.4　立式铣床上采用双工位夹具

1、2—工件　3—双工位夹具

另外，采用连续加工可显著地提高生产率。例如，在大量生产和成批生产时的铣削平面和磨削平面加工中已得到广泛应用。如图 4.5 所示立式连续回转工作台铣床加工，机床有两根主轴顺次进行粗、精铣削，装卸工件时机床不停机，因此辅助时间和基本时间重合。

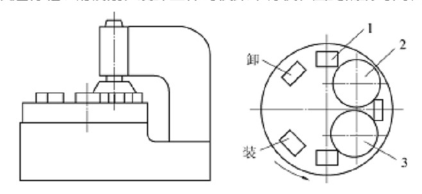


图 4.5　立式连续回转工作台铣床

1—工件　2—精铣刀　3—粗铣刀

3．缩短服务时间

工作地点服务时间，可分为技术服务时间和组织服务时间。技术服务时间是指工作班开始时，分配工具和工艺文件，在工作班结束后收拾工具、擦拭机床、清扫切屑及润滑机床等所需的时间；组织服务时间是指为了保持工作状态所需要的时间，如更换磨钝了的刀具，修理砂轮，对机床进行小调整所需的时间。工作地点服务时间很难精确计算，一般用工序作业时间的 2%～7%来估算。

工作地点服务时间主要应减少有关切削工具更换和调试的时间。为了缩短这个时间，常采取下列工艺措施。

(1) 采用各种快换刀夹和自动换刀装置、刀具微调装置、专用对刀样板、样件以及数控机床、加工中心机床所用的机外专用对刀装置等，以缩短更换刀具时所消耗的时间。

(2) 采用耐用度较高的重磨硬质合金刀片。这种刀片可根据需要做成三角形、四边形或其他多边形。使用时采用机械夹持的方法，在刀夹中定位夹紧。当一个切削刃磨钝后，可迅速将刀具转换到另一个切削刃，当刀刃都钝了后再换一个刀具。这样可以减少换刀、对刀和重磨的时间。

4．缩短准备终结时间

对成批生产来说，在加工一批工件开始和终结时，需要一定时间进行下列动作：熟悉工艺文件，领取毛坯、材料、刀具和夹具，调整机床，交付检验，发送成品，收还刀具、夹具等。完成这些动作所消耗的时间称为准备终结时间，一般用基本时间的 3%～5%进行估算。

特别提示

对一批工件来说，准备终结时间只有一次，批量越大，摊到每个工件上的时间 $T_{准-终}/n$ 越少，因此，大批量生产可以忽略不计。

缩短准备终结时间的方法，一般有下列几种。

(1) 使刀具、夹具的零部件通用化和标准化。这样不仅可以在一定范围内适应各种不同工件的加工而且可以在更换刀、夹具时，能迅速地换上预先调整好的标准备用刀架和夹具，以使准备终结时间减少。

(2) 采用成组加工，扩大相似零件的批量，以减少分摊到每个零件上的准备终结时间。由于工艺装备的适应范围相应加大，也就减少了工艺装备和设备的调整次数。

(3) 使用高效先进的加工设备和工艺装备，使之具有柔性，可以灵活地改变加工对象，从而可大大缩短准备终结时间。如采用仿形装置、程控装置、数控机床和加工中心机床等。

4.1.2　提高生产率的组织措施

最充分而有效地利用工作时间，与组织生产有很大的关系。为提高生产率，正确合理地组织生产包括很多问题，一般主要有下列几方面。

(1) 有关工艺过程的组织措施。这方面的措施包括：合理地安排工艺过程的进程；组织工作地点，使工作地点专业化，地点布置要合理，并在工作地点配备必需的工夹具等以保证工作的正常进行；组织多机床管理和组织流水生产等。

(2) 有关工作地点服务工作的措施。工作地点服务工作主要有：工作的分配；主要材料和辅助材料的分发；机床设备的调整、维护和修理；工作地点间的运输等。

(3) 有关生产管理的组织措施。组织材料的供应，改进仓库的管理以及改进运输工作与修理工作等。而这方面的生产管理计划、制订合理的定额及实行经济核算，对促进提高生产率有更为重大的影响。

(4) 专业化生产和协作方面的组织措施。在这方面的措施有：组织毛坯的专业化生产；标准件、典型零件生产的专业化；工艺装备和特种非标准设备的生产和协作等工作。

(5) 合理安排工人休息和自然需要的时间。指工人在工作班内所允许的必要的休息和生理上自然需要的时间，可用基本时间的 2%～6%来估算。在生产中合理地安排工休时间，科学地安排生产班次也是提高劳动生产率的有效手段。

合理地组织生产，不但可以减少辅助时间、服务时间和准备终结时间等，而且可使生产顺利进行并提高产品的质量。

4.2 成组技术

成组技术(Group Technology，GT)研究如何识别和发掘生产活动中有关事物的相似性，并充分利用它，即把相似的问题归类成组，寻求解决这一组问题的统一的最优方案，以取得所期望的经济效益。成组技术是一门生产技术科学，可以用来提高劳动生产率。

在生产领域，成组技术就是用科学的方法，在多品种生产中将相似零件组织在一起(成组)进行生产。以相似产品零件的“叠加批量”取代原来的单一品种批量，采用近似大批量生产中的高效工艺、设备及生产组织形式来进行生产，从而提高其生产率和经济效益。

4.2.1 概述

1. 成组技术的产生背景

近几十年，随着需求水平和市场经济的发展，现代机械行业面临极其严酷的外部环境挑战。

我国买方市场格局日益强化，工厂生产任务主要对应于买方的订单，商品种类日渐丰富，“新、奇、特”产品层出不穷，人们对机械产品的需求越来越难以满足，具体体现在对机械产品要求个性化，迫使设计人员必须开发并生产出众多新产品，以符合不同消费者的要求。因此，机械产品的更新速度明显加快，多品种、多型号的小批量加工显著增多。常常出现型号众多而产品产量较少的情况，甚至某些产品属于单件生产，所以要求生产加工技术灵活多变。

随着地球资源危机日益加重，人类环保意识提高，机械行业工作者除必须积极开发新材料和利用新能源外，还必须节约传统资源和减少能源消耗，因此，产品从设计到生产都必须节能环保，以降低成本，提高市场竞争力，保证可持续发展。

由此可看出，为适应多品种小批量生产方式的特点，现代生产技术和现代制造系统必须具有充分的柔性，即针对多品种小批量具有一种灵活应变的能力或者快速响应的能力。但近代机械行业生产中存在着开发新产品的生产技术准备体制不合理、生产技术和生产组织管理落后、规模大而效益差、不利于发展零部件专业化和工艺专业化等问题。为此，只

有将产品设计模块化、工艺准备标准化、生产体制专业化和生产系统柔性化 4 个方面统筹兼顾起来，利用成组技术原理将生产技术和生产组织管理综合成一体，才能解决机械工业现存的问题。于是，成组技术应运而生。

2．成组技术的发展

成组技术自 20 世纪 50 年代初苏联(米特洛范诺夫)提出至今已 50 多年，其发展大体可分为以下 3 个阶段。

(1) 成组加工阶段：20 世纪 50 年代初，由苏联(米特洛范诺夫)首先提出来，用于零件的机械加工。这时的成组技术主要是以工序为基础的，它根据零件的结构－工艺相似性，把相似的零件归并成组，使同组零件的工艺过程进一步统一，并按统一的工艺过程对机床、刀具进行统一调整，节约工艺准备时间，节约制造资源。

(2) 成组工艺阶段：20 世纪 50 年代末，成组加工被苏联和东欧国家迅速推广应用，并相继传到西欧，逐渐从机械加工延伸到其他工艺领域，如铸、锻、焊、冲压等工艺领域，使其适用于在一台设备上完成全部制造的单工序产品。这时成组加工即被改成为成组工艺。

(3) 成组技术阶段：20 世纪 60 年代初，结合成组工艺的应用，捷克斯洛伐克和德国的匹斯堡提出了分类编码，为识别事物的相似性和继承性提供了有效的途径。利用产品零件的分类编码系统，不仅可以建立一个企业生产产品的零件频谱而且还可以借此对零件进行分类和检索，使成组工艺从工艺领域扩展到产品设计领域，以至推向企业生产活动的各个方面。

20 世纪 60 年代中期，英国的伯别奇提出用生产流程分析法原理，建立与存在工艺相似性的零件组相对应的生产单元，进一步使企业的物流路线和生产流程趋于合理，从而有效地解决了生产管理问题和多工序中零件的成组加工问题，促使成组工艺进一步发展成为一种把生产技术与组织管理结合成一体的综合技术，即成组技术。

至今，随着人们对成组技术的进一步研究和广泛应用，成组技术已发展成为生产合理化和现代化的一项基础技术。要想使计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助工艺设计(CAPP)、自动编制零件数控程序(NCP)、计算机集成制造系统(CIMS)等在生产领域中发挥作用，就必须使计算机技术的应用与成组技术紧密结合。

3．成组技术的基本原理

传统的解决问题的习惯，是对每个事物采取孤立的原则和方法去解决相似或相同的问题，从而导致了不必要的多样化和重复性。而成组技术却是把表面上看似零乱的事物，利用它们之间的继承性、相似性，通过相应的分类技术，达到将它们各自归并成组的目的，然后针对每个组，通过合理化和标准化的处理，制定出解决同组事物共同问题所必需的统一原则和统一方法。

在机械行业中，成组技术就是通过设计标准化而有效地保持不同产品的结构－工艺继承性，又通过工艺标准化而充分利用零部件之间的结构－工艺相似性。结构－工艺继承性是设计标准化的前提，结构－工艺相似性是工艺标准化的基础。成组技术通过分类编码系统又反过来为设计标准化提供设计信息检索和反馈的手段，从而保证不同产品之间具有良好的继承性。分类编码系统也为工艺标准化提供了将零部件分类成组的工具，因而能充分利用零部件之间的相似性。

4.2.2　零件的分类编码系统

1．零件的分类和编码概念

在当今信息时代，信息的标志、储存、传递、处理已成为企业兴衰的关键。利用分类原理和编码原理，通过对信息进行分类和编码，并建立相应的分类编码系统，使信息能按照适宜的分类编码系统对有关事物的属性(或特征)进行规律性描述(即编码)，这是简化信息、实施科学管理的有效方法。

1) 零件的分类

分类是按照选定的属性(或特征)区分处理对象，并将具有某种共同属性(或特征)的对象集中在一起的过程。

分类系统是为了达到一定分类目的和要求而采用相应的分类原理、规则和步骤而构成的一个体系的总称。分类系统可更为简洁地看成是一系列分类环节标志的总和，因为被分类事物总是循序通过分类系统所规定的一个个分类环节，以及接受每个环节上的分类标志的对比检验而实现分类的，如图 4.6 所示。分类环节是事物在分类过程中所经历的每个层次或步骤，可进一步分为横向分类环节(又称粗分环节)和纵向分类环节(又称细分环节)。每一个横向环节都有一串纵向环节，换言之，每一串纵向环节都从属于某个横向环节。由于横向环节被赋予较为笼统的分类标志，所以它具有粗分的作用。对于某个指定的横向环节内的各纵向环节的分类标志，则是对此横向环节分类标志的进一步具体化和细化，因此每一串纵向环节便具有对被划分在所从属的那个横向环节中的事物进行细分的作用。若某事物能与某分类环节的分类标志所表示的特征和属性相似或相同，则此事物便被该分类环节所接受。图 4.7 为横向环节与纵向环节示意图。表示某个表格式分类系统中的某一横向环节的分类标志为：外旋转表面。这个分类标志比较笼统。因为实际上外旋转表面本身还包含着许多不同的形状，所以还需要在这横向环节下设置一串纵向环节进行细分。图中所示的光滑圆柱面、单向台阶圆柱面、双向台阶圆柱面、单向台阶圆锥面、双向台阶圆锥面、单向台阶球面、双向台阶球面等，便是这串纵向环节各自的分类标志。

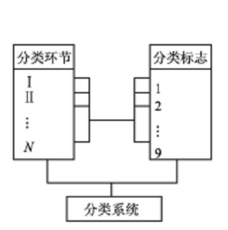


图 4.6　分类系统的结构含义

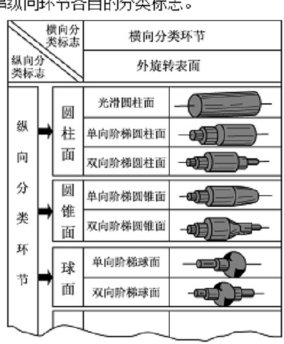


图 4.7　横向与纵向环节示意

2) 零件的编码

对于每个零件的分类结果，最为简便有效的莫过于使用代码对其进行表达。代码是表示事物(或概念)的一个或一组特定字符。编码是给事物(或概念)赋以代码的过程，即代码化。

零件分类中所使用的代码可选用阿拉伯数字(0，…，9)、英文字母(A，B，C，…，Z)，也可选用数字一字母混合作代码(如选用十六进制作代码)。

零件通过编码就可用代码来描述和表达各分类环节上的分类标志所描述的零件的特征和属性，将各代码按照需要进行某种规律组合就构成零件的编码。每种零件的编码不一定是唯一的，即相似的零件可以拥有相近的编码，这样就可划分相似零件组。

为了对编码的含义有统一认识，就必须对其所代表的意义做出规定性的说明，即确定出编码规则，这就构成了一个编码系统。

2. 典型分类编码系统简介

据资料统计，目前世界上已有 77 种通用分类编码系统，其中较为著名的有捷克斯洛伐克的 SUOSO(乌奥索)分类编码系统、德国的 OPITZ(奥匹兹)分类编码系统、日本的 KK-3 分类编码系统和中国的分类编码系统。这里着重介绍德国的 OPITZ(奥匹兹)分类编码系统和 JLBM-1 分类编码系统。

1) 德国的 OPITZ(奥匹兹)分类编码系统

OPITZ 系统是一个十进制的 9 位代码的混合结构分类编码系统。它是由德国 Aachen 工业大学 H.Opitz 教授领导的机床和生产工程实验室所开发的。这一系统原来是为前苏联德邦机床制造商协会(VDW)调查统计机床产品中各类零件构成和分布而设计的。因此，曾经用过 VDW 零件分类编码系统的名称。后来随着这一系统的完善而被用于成组技术中，并且鉴于它是 H.Poitz 教授领导开发的，特别是他为这一系统的分类法则和使用说明写过专著和一系列文章，因此如今习惯上都称它为 OPITZ 系统。

最早的 OPITZ 系统只有 5 位代码，即目前所称的形状码。20 世纪 60 年代中期，德国在用于成组技术的零件分类编码系统方面出现两大派别，彼此竞争较激烈。一派便是以 Aachen 工业大学为首，主张分类标志应以零件图样为依据而偏重零件结构形状为主；另一派是以 Stuttgart 大学为首的，认为分类标志应从生产角度出发而偏重零件工艺特征为主。在 OPITZ 系统的形状码中，仅用 L/D 来表示回转体零件类别的标志是很不充分的。试设想：一个普通紧固用的垫圈与一个汽轮机用的叶轮，两者的 L/D 相差无几，是否可将它们划分为一类零件？答案显然是否定的。Stuttgart 大学这一派正是以此来批评 OPITZ 系统的。他们指出 OPITZ 系统的不足，尤其是关于反应零件生产与工艺方面的特征较欠缺。为了完善自己的系统，OPITZ 教授在原来 5 位码之后，又增补了 4 位所谓的辅助码，以亡羊补牢，而增补的辅助码中的第一位码便是尺寸码：对于回转体类零件是其最大直径 D；对于非回转体类零件是其最大尺寸 A。图 4.8 为 OPITZ 系统的基本结构示意。

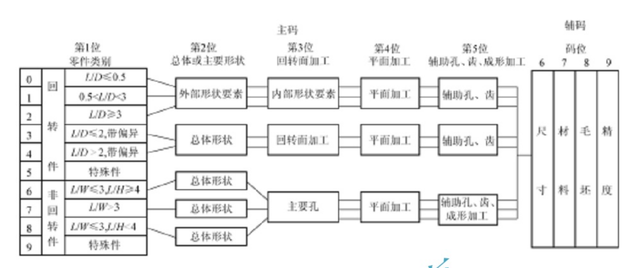


图 4.8　OPITZ 系统的基本结构示意

OPITZ 系统前面 5 个横向分类环节主要用来描述零件的基本形状要素。第一个横向分类环节主要用来区分回转体类与非回转体类的零件类别。对于回转体类零件，它用 L/D 来区分盘状、短轴和细长轴类零件；接着提出了回转类零件中的变异零件和特殊零件，如：用各种多边形钢制成的回转体零件以及多轴线零件等。对于非回转体零件，则用 A/B 与 $A/C(A>B>C)$来区分杆状、板状和块状类零件。同样，在非回转体零件中也考虑了特殊形状零件。系统的第二个横向分类环节至第五个横向分类环节，则是针对第一个横向分类环节中所确定的零件类别的环状细节，作进一步的描述并细分。对于无变异的正规回转体类零件，则按外部形状→内部形状→平面加工→辅助孔、齿形和成形加工这样的顺序细分。对于有变异的非正规回转体零件，则按总体形状→回转加工→平面加工→辅助孔、齿形和成形加工的顺序细分。对于非回转体类零件，则按总体形状→主要孔→平面加工→辅助孔、齿形与成形加工的顺序细分。至于回转体类与非回转体类中的特殊零件，则其第二至第五横向分类环节的分类标志内容均留给用户按各自产品中的特殊零件结构—工艺特征来确定。

OPITZ 系统的辅助码部分，实际上是一个公用部分。即不论回转体类或非回转体类零件，均需用到这一部分，故而这一部分的横向分类环节皆为独立环节，与其前面的所谓主码部分互不相干。辅助码部分从第六个横向分类环节开始，用来划分零件的主要尺寸。对于回转体类零件是指其最大直径 D；对于非回转体类零件则指其最大长度 A。第七个横向分类环节是以材料种类作为其分类标志，但其中也附带考虑部分热处理信息。第八个横向分类环节的分类标志为毛坯原始形状。单有材料种类标志，只能知道零件是由何种材料制成，例如：某种零件系用碳钢制成，可是究竟该零件的毛坯是棒料还是锻件，则还有赖于毛坯原始形状这一标志加以说明。最后一个，即第九个横向分类环节，则是说明零件加工精度的分类标志。其作用在于提示零件上何种加工表面有精度要求，以便在安排工艺时要加以考虑。

为了熟悉 OPITZ 系统的分类编码方法，用图 4.9 中所示零件为例。示例的分类编码结果如图 4.10 所示。

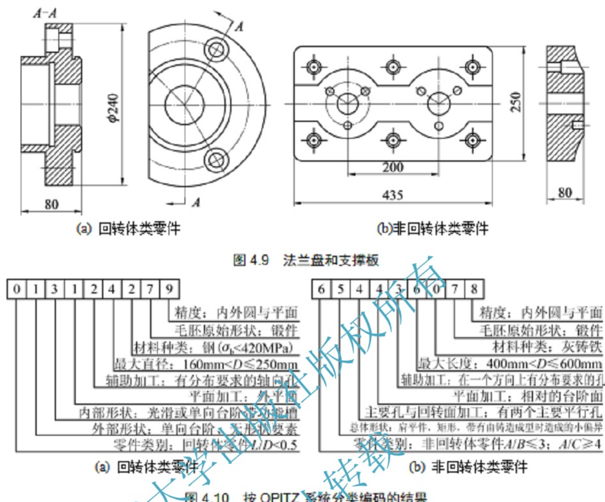


图 4.9　法兰盘和支撑板

图 4.10　按 OPITZ 系统分类编码的结果

OPITZ 系统的特点可以归纳如下。

(1) 系统的结构比较简单，仅有九个横向分类环节，因此便于记忆和手工分类。

(2) 系统的分类标志虽然形式上偏重零件结构特征，但是实际上隐含着工艺信息。例如，零件的尺寸标志，既反映零件在结构上的大小，同时也反映零件在加工中所用机床和工艺装备的规格大小。OPITZ 系统在横向分类环节的前后顺序的安排如下：外部形状→内部形状→平面加工→辅助孔、齿形与成形加工的这一顺序，本身就体现了回转体零件工艺过程的基本工序顺序，因此这也隐含着工艺特征。

(3) 虽然系统考虑了精度标志，但是由于零件的精确概念比较复杂，它既有尺寸精度，又有几何形状精度和位置精度，所以单用一个横向分类环节来表示似乎不够。不过这总比不设精度环节要好得多。

(4) 系统的分类标志尚欠严密和准确。这给具体分类增加了困难，因而造成所谓的高代码掩盖低代码的问题。例如：一个回转体零件的外部形状既有功能槽，又有螺纹和功能锥面，便被分在单有功能锥面的代码里。显然，这是不尽合理的。

(5) 从总体结构来看，系统虽属简单，但从局部结构看，仍旧十分复杂。因为系统中采用了关联环节，所以不少零件类别都各有一套分类表。这在具体分类实践中也实非易事。

2) JLBM-1 分类编码系统

JLBM-1 系统是我国机械工业部为在机械加工中推行成组技术而研发的一个十进制 15

位码的混合结构分类编码系统，其基本结构如图 4.11 所示。它克服了 OPITZ 系统的分类标志不全和 KK-3 系统环节过多等缺点。



图 4.11　JLBM-1 系统分类编码的结果

JLBM-1 系统由于增加形状加工的环节，因而比 OPITZ 系统可以容纳较多的分类标志，它在系统的总体组成上，要比 OPITZ 系统简单，因此也易于使用。

JLBM-1 系统的主要缺点在于把设计检索的环节分散布置。实际上，所谓辅助码部分的环节都是和设计有关的；而且这类环节上的分类标志，相对而言，是比较稳定的，如材料种类、毛坯原始形状、主要尺寸、热处理等的变化较少。对于这类稳定而少变的环节，应该尽量配置在系统的最前面。否则，如形状加工这类常需要调整和变动的环节，如果安排在系统的中间，一旦要扩充环节，就需要改变那些所谓辅助码的位置。这样便无疑会自找麻烦。与其如此，还不如让常需要增删的变动环节设置在系统的后部。这时，若要增加或减少易变环节，则可自由延伸或缩短，而不至于影响其他稳定环节的位置。

JLBM-1 系统是作为机械行业在机械加工中推行成组技术用的一种零件分类编码系统。它力求能满足行业中各种不同产品零件的分类之用。要想满意地达到这一目标是相当困难的。因为机械产品小如精密仪表、大至重型机械，产品零件的品种范围极广，所以想要用一个产品零件分类编码系统包罗万象，那是不大可能的。为此，系统中的形状加工环节完全可以由企业根据各自产品零件的结构—工艺特征自行设计安装。而零件功能—名称、材料种类与毛坯类型、热处理、主要尺寸、精度等环节则应该成为 JLBM-1 系统的基本组成部分。做好这个部分的统一工作，使之具有通用性，其意义十分深远。

JLBM-1 系统虽然增加了横向分类环节，但是由于它除第一、第二环节为关联环节外，其余都是独立环节，因此它比 OPITZ 系统净增 6 个横向分类环节，而实际上纵向分类环节的数量却增加有限。正因为如此，JLBM-1 系统也仍然存在标志不全，以致使零件无法确切分类编码。尤其如热处理环节，一些常用的热处理组合在系统中无反应。例如：零件既有调质又有淬火，便找不到相应的标志去标志。在贯彻 JLBM-1 系统之前，先要对零件名称统一，否则将会造成不堪设想的混乱后果，从而达不到成组技术所要求的分类目的。

JLBM-1 系统，随着使用过程中出现问题并不断的予以改进，将会使 JLBM-1 系统日趋完善。图 4.12 是按 JLBM-1 系统对图 4.9 中所示零件进行分类编码的结果。

码位值	含义
0	名称类别粗分：回转体、板块类
2	名称类别细分：法兰盘
1	外部基本形状：单向台阶
0	外部功能要素：无
5	内部基本形状：双向台阶通孔
1	内部功能要素：有环槽
1	外平面与端面：单一平面
0	内平面：无
1	非同轴线孔：均布轴向孔
2	材料：普通钢
6	毛坯原始形状：锻件
0	热处理：无
5	主要尺寸（直径）：D>160～440mm
1	主要尺寸（长度）：L>50～440mm
3	精度：内外圆与平面

(a) 回转体类零件

码位值	含义
7	名称类别粗分：非回转体、板块类
2	名称类别细分：支撑板
1	外部总体形状：由直线和曲线组成轮廓
2	外部平面加工：两侧平行平面
0	外部曲面加工：无
0	外部形状要素：无
3	主孔加工：无螺纹，有多轴线平行孔
0	内部加工：无
2	辅助加工：其他
0	材料：灰铸铁
5	毛坯原始形状：锻件
0	热处理：无
7	主要尺寸（宽度）：B>160～440mm
5	主要尺寸（长度）：L>250～500mm
3	精度：内孔与平面

(b) 非回转体类零件

图 4.12　JLBM-1 分类编码系统的分类编码结果

至此，扼要介绍了两种分类编码系统的结构、特点和应用实例。从应用实例中，也可以通过分类编码结果的对比而进一步了解各个系统的优缺点。

4.2.3　零件分类成组方法

1. 概述

成组技术的基本原理乃是充分认识和利用生产活动中有关事物客观存在着的相似性以提高生产的效益。因此，按一定的准则将有关事物分类成组是实施成组技术的基础。

“组”一般理解为具有某些共同属性的事物的集合。成组技术在研究零件分类时，常采用“零件族”这一更为形象的概念。所谓零件分类成组，就是按照一定的相似性准则，将品种繁多的零件归并成若干具有某些特征相似的零件组并组成零件族。可以认为，零件族是具有某些共同属性的零件集合。采用不同的相似性标准，可将零件划分为具有不同属性的零件族。只有将零件归并成零件族，才能有效地检索零件图样，避免不必要的重复设计，减少设计工作量，促进设计标准化；只有形成了零件加工组，才能设计成组工艺过程，采用成组工装和设备，进行成组加工；也只有对零件进行分类成组，才有可能改变传统的生产组织形式，以成组方式组织生产和管理生产，提高整个企业的管理水平。因此，零件的分类编组是实施成组技术的核心和关键。

零件分类编组的目的不同，对于零件特征相似性的要求也不同。为了实施成组工艺，有些零件外观上看来并不相似，但因有共同的工艺过程就可将其分在一个零件族内，然后根据对零件上某些特征统计分析结果，结合本企业的实际加工能力、管理条件、机床负荷、工作计划等情况，再把一个零件族细分为几个零件组或把几个零件组合并成一个零件组，从而建立和零件组相对应的生产单元。

例如根据分类的目的要求，制定相应的分类的相似性标准，可将零件分类以组成设计族、加工族或管理族等。表 4-1 表示了各种零件族的分类标准及应用。

目前应用的零件分类方法主要有视检法、生产流程分析法和编码分类法。本节着重介绍后两种方法。

表 4-1 各种零件族的分类标准及应用

零件族	相似性特征	应　用
设计族	零件功能、几何形状、成形方式及加工特点等	零件图样检索、设计合理化及标准化、CAD 等
加工族	零件几何形状、加工工艺、材料、毛坯类型、加工尺寸、加工设备及工艺装备等	成组技术、设备布置、成组工艺过程设计、成组夹具设计、CAM 等
数控族	是加工族的一种特殊形式，按数控加工相似性分类，相似性特征与加工族类似	NC 机床使用合理化，简化数控编程工作，限制程序设计的多样性，减少加工刀具的种类等
管理族	在建立加工族的基础上考虑与管理有关的因素：GT 生产组织形式、批量、制造指令停留时间、工装种类及复杂程度、制造加工复杂程度	GT 生产管理，合理地安排作业计划和载荷的调整、补偿，拟定制造指令的替换方案，建立计算机辅助管理系统

2. 生产流程分析法

生产流程分析法是通过分析全部零件的工艺流程(工艺过程)，识别出客观存在的零件工艺相似性，从而划分出零件族。这种方法仅适用于成组工艺，它完全不考虑零件的功能形状相似特征。所以这种方法只与企业目前所使用的加工方法和机床设备有关，并不改变目前正在使用的加工方法或进行某种技术革新也不需增加新的设备投资。因此这种方法的实质是对机床设备重新进行合理的布置，改善零件的工艺流程和简化生产组织工作，从而取得良好的技术经济效果，以提高劳动生产率。

1) 生产流程分析的基本原理

生产流程分析(Production Flow Analysis，PFA)是研究工厂生产活动中物料流程客观规律的一种统计分析方法。它着重分析生产过程中从原材料到产品的物料流程，研究最佳的物料流程系统。因此，生产流程分析可应用于工厂规划、设计和物料科学管理等方面。

生产流程分析法一般包括以下三个主要阶段：工厂流程分析、车间流程分析和生产单元流程分析。

工厂流程分析是对全厂的物料流程进行统计分析，以正确地组成和划分各个生产车间与管理部门，使工厂全过程有合理的物料流程。通过工厂流程分析可以决定各车间的生产任务和设备。

车间流程分析是对本车间生产的全部零件的工艺过程进行统计分析，按工艺过程将零件划分为加工族，与此同时也寻求出加工各加工族的相应的一组设备(机床)。因此，车间生产流程分析有助于正确地规划车间的组成和简化车间物料流程。

生产单元流程分析是以单元内生产零件为对象，通过进一步对工艺过程的分析，可以寻求单元最合理的设备平面布置。对单元内生产零件的加工工艺过程进行分析，还可以把加工族细分为具有某些工艺特征的零件小组，这将有助于成组工艺过程、成组工艺调整方案和成组夹具等方面的设计工作。

以上所述表明，生产流程分析的 3 个阶段分析范围和目的是各不相同的，但它们是彼此紧密联系的，一般前一阶段是后一阶段的必要前提。应用生产流程分析将零件分类，一般包括工厂的和车间的生产流程分析这两个阶段，而关键的一步是车间生产流程分析。通

过车间生产流程分析不仅能将零件分类形成加工族，同时能决定出其相对应的加工设备(机床)组，因此它常用于成组生产单元的设计。

例如：车间流程分析的主要步骤：数据采集、工艺过程编码、建立原始零件—机床数据矩阵表、生产流程分析。

2) 零件分类方法

(1) 顺序分枝法。顺序分枝法是将待分类的全部零件按其工艺过程逐个判别，使之归属于相应的各级分枝组，进入各级分枝组内的各零件在工序(主要的)类型、数量和顺序上完全一致；然后，遵循一定的并枝原则把各级分枝组合并为零件种数适当的加工族。

用顺序分枝法对零件分类包括两个过程：分枝过程和并枝过程。

(2) 聚类分析法。聚类分析是一种数值分类方法，它是模式识别技术中用于解决无监督分类问题，研究物以类聚的一种多元分析方法，即用某一数学统计量定量地确定样品之间的亲疏关系，从而客观地将样品分类。

(3) 分枝—聚类法。顺序分枝法和聚类分析法各有优缺点，若将此两种方法综合应用，扬长避短，相互补充，就可以获得一种更为完善的实用分类方法，即分枝—聚类方法。

分枝—聚类方法提出了一种新的描述零件之间相似性的模型和归类成组过程，它将零件的分类分为顺序分枝过程和聚类过程。

(4) 排序聚类分析法。排序聚类分析法是一种直接交换零件—机床矩阵中的数据，使其成对角线块分布，每一个块的数据对应着一个相似零件族及其相应的机床组，从而实现零件分类的分析方法。

(5) 零件分类结果的评价方法。以上简要介绍了多种基于生产流程分析的零件分类方法。对于相同的数据，用不同的分类方法可得到不同的分类结果。即使是相同的分类方法，由于选择不同的控制参数，也将造成不同的分类结果。因此，有必要从众多的分类结果中挑选出一个最理想的分类结果。

在分类零件数量比较少的场合，直接观察分类结果，通过主观判断，可以比较容易地选出较好的分类结果。随着零件数量的增多，越来越难于主观地判断分类结果的好坏，因此，需要用客观的评价方法来评价零件的分类结果。

可以用四个指标评价零件的分类结果，即总结合能量(BE)、特殊元素百分比(PE)、机床利用率(MU)、成组效率(GE)。

3. 编码分类法

1) 零件分类的相似性标准

零件的编码是有关特征信息的组合，分类乃是将在若干特征方面具有相似性的零件归结在一起。因此，按照一定的相似性标准可直接引用编码对零件进行分类。

按某些相似特征将零件分类，困难在于制订适宜的相似性标准。在掌握相似性标准时，应注意到两个方面。

(1) 相似性标准不能太高、要求过严，以致使零件不易汇集成组。这样会导致不重要的特征差别掩盖了实际存在着的、并可利用的相似性。在极端的情况下，这将使零件的分类转变为对零件的识别。

(2) 相似性标准不能太低，过于粗略，以致归属于同一组的零件种数太多，使组内零

件间差异太大，从而妨碍了很好地利用零件的相似性。

按编码分类，总是根据分类的目的规定零件在某些特征方面应具有的相似性。制定零件族相似性标准有 3 种方法：特征码位法、码域法和特征位码域法。

2) 编码分类法原理

为实行编码分类法，首先需要合理地制定各零件族的相似性标准，以便将众多的待分类零件进行分选，使之归属于相应的零件族。图 4.13 所示为编码分类法原理简图。编码分类法实质就是让零件编码与各零件族特征矩阵逐个地匹配比较，若零件编码与某一零件族特征矩阵相匹配，则该零件就应归属于此零件族。例如，零件编码：100 300 500、110 301 300 及 220 301 200 皆与 No.1 零件族特征矩阵(如图 4.13 所示)相匹配，因此它们都分属于零件族 No.1。

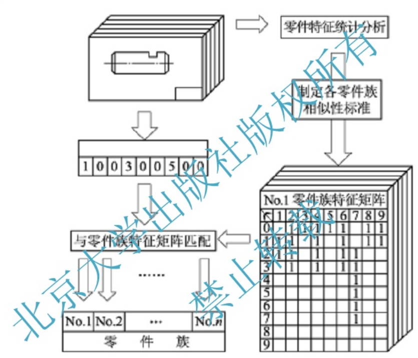


图 4.13　编码分类法原理简图

合理制定各零件族相似性标准是按编码分类取得满意结果的关键。相似性标准与分类的目的要求密切相关，据此考虑零件族相似属性的范畴及其相似程度的高低。显然，设计族与加工族的相似属性要求是有差别的。前者着重零件结构功能等方面；后者除结构属性以外，尚应考虑到加工相似属性方面。一般应根据试分类结果，对制定的分类相似性标准进行检验，以便做出必要的修正。

用生产流程分析法或视检法分类形成的加工族，可作为编码分类法制定加工族相似性标准的模型。

3) 计算机辅助编码分类法

编码分类法需要将众多的零件编码与各零件族特征矩阵逐个匹配，其包括大量的筛选分类工作，既繁琐又易出差错，适宜采用计算机辅助。根据编码分类法原理不难设计出零件分类程序，图 4.14 所示为用于微型计算机的一种分类程序框图。程序设有两个数据文件，分别储存各设计族相似性特征矩阵和待分类零件的编码(识别码及分类码)，以备程序运行

时调用，这样可少占用计算机内存。如图 4.14 所示，分类是这样进行的：先取出一个设计族相似特征矩阵，令其与所有的待分类零件逐个相匹配，凡是与其相匹配的皆归属于该设计族，并可随即打印输出，照此循环直至存储的所有设计族特征矩阵依次与等待分类的各零件都进行过匹配为止。

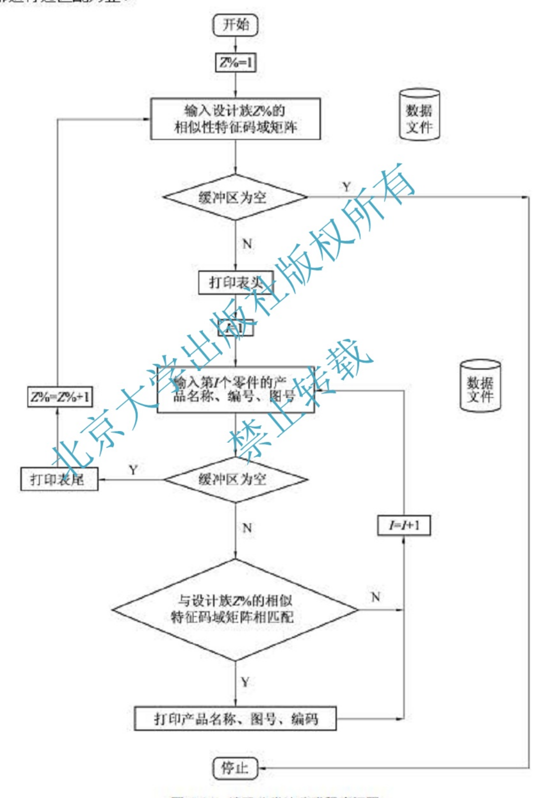


图 4.14　编码分类法分类程序框图

4.2.4　成组加工工艺的制订

成组工艺的目的是提高劳动生产率。工艺设计是连接产品设计和产品制造的重要纽带。没有正确合理的工艺设计，就不可能经济而有效地将设计蓝图变成合格产品。因此，工艺设计对企业生产的影响极大，是提高劳动生产率的关键。

传统机械加工工艺的制定过程中，普遍存在着编制零件工艺工作的重复性和同类零件的工艺多样性问题。在目前单件小批量生产占主导地位的情况下，利用成组工艺可解决这些问题，使其获得较好的工作效益和经济效益，显著地提高劳动生产率。

1．零件分类编码

各个制造企业可根据具体情况选用合适的系统对零件进行分类编码。编码方法有手工编码和计算机辅助编码两种。手工编码是根据编码法则，对照零件图用手工的方式逐一编出各个码位的代码，显然手工编码效率低，劳动强度大，而且容易出错。现在较好的方法是用计算机辅助编码，可以采用问答式和菜单式两种方法。利用计算机编码效率高，准确性好，劳动强度低，可以提高劳动生产率(详见前文)。

2．划分零件组

对零件分类编码完毕后，需根据其结构特征和工艺特征的相似性进行分类成组，目前常用的零件分类成组方法有生产流程分析法，编码分类法(详见前文)。

3．工艺设计标准化与成组工艺过程

成组工艺与典型工艺不同，编制成组工艺的目的，是为了实现工艺标准化。成组工艺并不强求零件的结构和功用必须相同，也不是首先去着眼于统一同类零件的整个工艺过程，而是着眼于构成零件整个工艺过程中的一道道工序，即将工艺过程相似(不一定相同)、工序相同(设备相同、工序相似、调整方法相同)的零件归为一组，共用一个工艺文件(成组工艺)。使新产品中的零件工艺相似不必另外编制单独的工艺，而可直接检索并沿用已有的相似零件组的成组工艺。在计算机技术引入该领域后，编制成组工艺更能体现其优越性。

根据零件结构特点和已有资料、条件的不同，可采用不同的编制方法。

1) 复合零件法

对于结构较简单的回转体零件多采用复合零件法(又称样件法)，即利用一种所谓的复合零件来编制成组工艺的方法。复合零件可以是某个有代表性的具体零件，也可是虚拟的假想零件，它必须具有同组零件的全部待加工的表面要素。

2) 复合路线法

对于用流程分析法分组的非回转体类零件，一般采用复合路线法来编制同组零件的成组工艺，即从同组零件中，先以组内最复杂零件的工艺路线入手，然后与组内其他零件的工艺路线相比较，凡组内其他零件所需要而且最复杂的工艺路线所没有的工序，可分别添上，于是最终形成一个能满足全组零件加工要求的成组工艺过程。

对既无专用工艺又不便于绘制复合零件的零件组，多采用综合分析法编制成组工艺。

4．设计成组夹具

成组夹具是推行成组工艺的重要物质基础之一，成组夹具的性能优劣直接关系到成组

技术的效果，成组夹具设计是建立在进行零件工艺分析的基础上的，应注意对零件的定位夹紧系统的共性进行充分研究，以便为成组夹具设计提供依据。

一般做法是，先以典型零件为代表，或虚拟出典型的代表零件。然后再将代表零件的主要加工表面加以典型化，或把同组零件的所有加工表面复合成为代表零件的加工表面，从而以它作为主要的加工对象进行构思。对于成组夹具的有关尺寸，可运用统计方法列出范围，作为设计参考，在保证可靠性的基础上，更加快捷高效。

5. 选择成组加工设备

根据加工对象及其批量合理选择成组加工用的设备。即在成组加工中，应根据工件品种、批量、精度和现场条件，选用各种适宜的工艺装备。除可以选择通用机床、数控机床之外，必要时也可按成组技术原理设计成组机床。

成组加工的机床按工艺路线编制成机床组，按需要进行合理布置，机床布置确定后，生产组织形式也就随之确定。

4.2.5　成组生产的组织形式

在目前成组加工中，其生产组织形式主要有成组单机、成组生产单元、成组生产流水线和自动化成组生产单元。这 4 种基本形式是介于机群式和流水线之间的设备布置形式。机群式适用于传统的单件小批量生产，流水线则更适用于传统的大批量生产。

1. 成组单机

成组单机是成组技术中生产组织形式的最简单形式，它是在一台机床上实施成组技术。是把工序相同或相似的零件组集中在一台机床上进行加工。特点是从毛坯到产品多数可在同一种类型的设备上完成，也可仅完成其中某几道工序的加工。如在转塔车床、自动车床加工的中小零件，多半属于这种类型。这种组织形式是最初级的形式，最容易实现，但对较复杂的零件，需用多台机床完成时，其效果就不显著。值得一提的是，自从出现加工中心以来，成组单机加工又重新得到重视。

用这种方式进行零件加工时，零件组中的每个零件(或某一工序)必须具有以下两个特点：零件必须具有相同的装夹方式；零件在空间位置和尺寸方面必须具有相同或相似的加工表面，但并不要求零件的形状相同，而是只考虑加工表面位置和尺寸的相似性。

2. 成组生产单元

成组生产单元是成组技术在加工中应用的最典型形式，是高度自动化的柔性制造系统的雏形，是一种富有生命力的生产组织形式。成组生产单元是指在车间的一定生产面积上，配置着一组机床和一组生产工人，用以完成一组或几组在工艺上相似的零件的全部工艺过程。

图 4.15 为成组生产单元的平面布置示意图。由图可见，成组生产单元的优点是：单元内零件不需要按“批”做工序间的顺序转移，原则上可以逐件传送或几件一起传送，但它不同于流水线，因为它不要求供需之间保持一定的节拍，这样就可以缩短路线，减少在制品数量。由于成组生产单元的生产管理有一定的独立性，因而便于成本核算、计划管理、质量控制和生产调度，也便于实际生产责任制，有利于提高工人的工作责任感和生产积极

性。实践证明，成组生产单元是一种先进的生产组织形式，为世界各国的中、小批生产企业广泛采用。

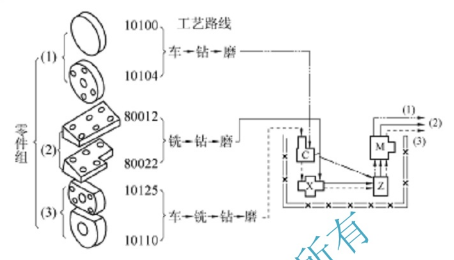


图 4.15　成组生产单元的平面布置示意

3. 成组生产流水线

成组生产流水线是在机床单元的基础上，将各工作地(设备)按照零件组的加工顺序固定布置。它与一般流水线的区别在于，在它上面流动的不是一种零件，而是一组工艺相似程度很高，且产量也较大的零件。这组零件应有相同的个性加工顺序，近似相等的加工节拍，允许某些零件越过某些工序，这样使其成组流水线的适应性较强，能加工多种零件。

4. 自动化成组生产单元

自动化成组生产单元是成组流水线的高级形式，实现了成组生产单元的自动化，故也可称为柔性自动生产线(FML)。近代迅速发展的柔性制造系统(FMS)实质上就是自动化成组生产单元。它是由计算机控制管理的若干台数控机床(包括各种类型的加工中心)和物料储存和输送设备所组成的成组生产单元。自动化成组生产单元除了能生产多种工艺相似的零件，具有较大的柔性，还有较高的设备利用率。

成组生产系统应采用适当类型的成组生产组织形式，为此应对生产纲领、零件相似性、设备负荷以及工厂企业发展规划等方面作综合的分析考虑。根据需要，在生产中可以同时选用几种类型的成组生产单元；还可以保留机床按机群式布置的传统的生产组织形式(如一个班组、工段或车间)，以便加工不能归类成组的其余的零件，或应付特殊加工任务。

4.2.6　成组技术的优越性

成组技术的优越性可以简单地归纳为以下 5 个方面：提高生产率，保证产品质量，促进产品的系列化、通用化和标准化，促进生产管理工作的现代化及缩短产品的生产周期。

上述 5 个方面的优越性集中体现在技术经济效益上。根据国内外有关资料统计，采用成组技术后，技术经济效益的具体数据见表 4-2。并且成组技术是计算机辅助工艺设计的基础之一，在成组技术基础上发展起来的派生式 CAPP 设计方法，已经成为工艺现代化的一种主要方法。另外，成组技术对柔性制造系统和集成制造技术的发展产生了深刻影响。

表 4-2 采用成组技术产生的技术经济效益

1	新设计的零件数量	减少 52%
2	产品样纸总数量	减少 10%
3	新绘图样数量	减少 30%
4	设计周期	缩短 55%～85%
5	生产准备周期	减少 60%
6	生产准备费用	减少 50%
7	原材料库存量	减少 40%
8	在制品存放量	减少 62%
9	零件制造时间	减少 25%～40%
10	废品率	降低 60%
11	生产周期	缩短 55%～85%
12	拖期交货	减少 80%
13	产量	提高 5%～20%
14	调整时间	减少 25%～50%
15	企业管理时间	减少 60%
16	零件加工总成本	降低 43%
17	运行费	减少 47%
18	生产面积	减少 20%
19	固定资产费用	减少 40%
20	销售量	增加 30%～55%

4.3 计算机辅助工艺规程设计

4.3.1 概述

1. 传统工艺设计

机械制造是一种离散的生产过程。机械制造的基本特点是按照设计要求和工艺要求对毛坯进行加工，将设计信息和工艺信息逐步物化到毛坯上，使之转化成为加工后的零件；并按照设计要求，将加工后的零件与标准件、外购件一起组装成为产品。工艺设计大致包含两个方面。

1) 生成工艺路线

建立加工前零件的被加工工序序列，包含确定工序内容、选择加工设备、确定定位基准及装卡面、确定加工顺序等。

2) 设计工艺规程

确定各个工序的实施方案，包括确定工序内容、选择加工设备、确定毛坯尺寸、工序尺寸及余量、选择刀具及工装卡具、选择加工参数、制定加工程序、确定检验方法、计算工时定额、估计加工成本、提出加工注意事项等，最后完成工艺设计文件。

传统工艺设计是由工艺师人工逐件设计的，工艺文件内容、质量以及编制用时取决于工艺师的经验和技术娴熟程度。这种状况必然导致工艺文件的多样性、设计时间长和质量不易保证；另外对相似零件(如系列化产品)手工编制工艺时，还不可避免产生许多重复的

劳动；使用传统方法编制工艺时，许多制造资源得不到有效利用，常常产生重复设计、制造或购买工装等辅具，造成制造资源浪费。这些传统工艺存在的不足与现代多品种小批量生产不相适应。

2．CAPP 的产生

20 世纪计算机技术迅速发展，特别是在机械制造领域中应用日益广泛，出现了计算机辅助工艺规程设计(Computer Aided Process Planning，CAPP)这一新技术。

最初的 CAPP 系统是在 20 世纪 60 年代后期开始研究的，1976 年第一个派生式 CAPP 系统研制成功，到 80 年代才逐渐受到工业界重视，并得到迅速发展。早期开发的 CAPP 系统主要是以检索方式，与传统工艺设计相比，可以减少工艺师重复繁琐的修改编写工作，并能提高工艺文件质量。

随着计算机技术的发展，CAPP 系统开发人员将成组技术和逻辑决策技术引入 CAPP，开发出许多以成组技术为基础的派生式 CAPP 系统和以决策规则为工艺生成基础的创成式 CAPP 系统，以及基于人工智能技术的专家系统，使 CAPP 系统向智能化方向发展；CAPP 系统的构成也由单一模式向多模式系统发展，使其更适用于不同对象的工艺编制需求；系统结构也由原先的单一孤立的系统向 CAD/CAM 集成化方向发展，使其成为 CAD 和 CAM 之间的纽带；另外现在的 CAPP 系统也越来越注重制造资源在工艺文件中的管理，许多偏重于工艺管理的 CAPP 系统已经开发出来并在一些中小型企业中得到很好的应用。

计算机辅助工艺规程设计(CAPP)，是在成组技术的基础上，通过向计算机输入被加工零件的原始数据、加工条件和加工要求，经由计算机处理并自动进行编码、编程，直至最后输出经过优化的工艺路线、工序内容和工艺文件。

实践经验证明，应用 CAPP 能显著提高工艺文件的质量和工作效率，主要体现在以下方面。

(1) 缩短生产准备周期。应用 CAPP 一方面可将工艺设计人员从繁杂的劳动中解放出来，另一方面大大减少工艺编制的时间和费用，缩短生产准备周期，降低制造成本，提高产品在市场上的竞争力。

(2) 减少工艺编制对工艺人员技能和经验的依赖。由于 CAPP 本身具有的创成性，可以降低对工艺人员的技能要求，减少对工艺人员经验的依赖性。

(3) 保证工艺文件的一致性。由于相似零部件的工艺过程来源于同一标准工艺或基于同一知识库和同一推理机，因此便于编制出方案较优、一致性更好的工艺，有利于实现工艺过程的标准化。

(4) 有利于计算机集成制造系统集成。CAPP 是 CAD 与 CAM 系统信息集成的纽带，CAPP 不仅能利用计算机编制工艺，而且能利用计算机实现生产计划最优化及作业过程最优化，从而构成产品制造过程、制造资源计划(Manufacturing Resource Planning，MRP-II)和企业资源计划(Enterprise Resource Planning，ERP)的重要组成部分。CAPP 是实现 CIMS 集成的关键技术，也是企业实施 CIMS 的重要保证。

4.3.2　CAPP 的组成及基本技术

1．CAPP 的组成

为了适应多变的产品种类、制造环境的要求，CAPP 系统应包括如下的功能模块。

(1) 输入模块：将零件图或 CAD 系统中的零件信息通过直接的信息转换接口或人工方式输入，转化为生成工艺路线和进行工艺设计所需要的数据结构。

(2) 工艺规程设计模块：用来进行工艺流程的决策，生成工序卡，并对工序间尺寸进行计算，生成工序图；确定工序的各工步，选定机床和工夹量具，确定加工余量和工艺参数，计算切削用量和工时定额，最终生成工步卡，并形成数控加工指令所需的刀位文件。

(3) 数控加工指令生成与加工过程动态仿真模块：根据刀位文件和具体数控机床的特点，生成数控加工指令，并利用仿真技术检验工艺过程及数控指令是否正确。

(4) 输出模块：输出工艺过程卡、工序卡、工步卡、工序图等各类文档，并可进行编辑修改，输出合格的工艺文件。

(5) 修改模块：进行现有规程的修改。

(6) 控制模块：对整个系统的控制和管理。

(7) 各类库存信息：工程数据库(包括材料、加工方法、机床、刀具、装夹方法、切削条件等)，数据词典库，工序子图库，工艺知识库，工艺规则库，工艺文件库，NC 代码等。

2. CAPP 基本技术

CAPP 系统的基本技术主要包括如下几个方面。

(1) 成组技术：成组技术是 CAPP 系统的基础支撑技术。早期的 CAPP 系统一般是以成组技术为基础的派生式 CAPP 系统，其内核是利用成组技术将零件编码分类形成若干加工族，再编制族中复合零件或主样件的标准工艺过程。

(2) 零件信息的描述与转换：零件信息是工艺信息的来源，主要来自零件图、CAD 系统或集成化的产品模型并进行转化得到。如何描述与转换零件信息是 CAPP 系统的关键技术，也是 CAD/CAPP/CAM 系统有效集成的关键问题。

(3) 工艺设计决策：工艺设计决策的内容包括工艺流程、工步及工艺参数决策。其核心是特征型面的加工方法选择、零件加工工序及工步的安排及组合等，利用综合分析、动态优化及交叉设计等方法使工艺设计达到全局最优化。

(4) 工艺知识的获取与表示：工艺设计一般依赖于工艺设计人员的经验、技术水平。应总结出适应本企业零件加工的典型工艺及工艺决策方法，开展专家系统和知识库的建设工作，使工艺设计在企业内得到广泛而有效的应用，从而提高工艺设计的效率和质量。

(5) 工艺文件管理：工艺文件主要包括 CAPP 系统输出的文档，如工艺过程卡、工序图、工序卡、NC 加工指令、刀夹量具清单、机床设备清单等，应加强工艺文件库的建设工作，使资源得到充分的利用，也为企业实施产品数据管理(Product Data Management，PDM)打下良好的基础。

4.3.3 CAPP 的类型及基本原理

1. CAPP 系统的分类

在编制零件加工工艺时，不同的工艺过程往往与工艺人员的经验、零件数量及编制工艺过程的频繁程度密切相关，很难用一种通用的 CAPP 软件来满足各种不同零件的工艺编制。因此按照工艺决策方法的不同，CAPP 系统可分为检索式 CAPP 系统、派生式 CAPP 系统、创成式 CAPP 系统、智能型 CAPP 系统(专家系统)及综合式 CAPP 系统共 5 种类型。

2. 各种 CAPP 系统的基本原理

1) 检索式 CAPP 系统

检索式 CAPP 系统实际上是工艺过程的技术档案管理和文字处理系统。其自动化和智能化程度较低，自动决策能力差，工艺决策完全由工艺设计人员完成。检索式 CAPP 系统的基本原理是事先将已有零件的工艺过程存入计算机工艺文件数据库中，进行工艺设计时，按零件编码或图号检索工艺文件数据库，再通过人机交互方式，对检索出的相似零件的工艺过程进行修改或重新编制新的工艺过程。图 4.16 为检索式 CAPP 系统流程示意。

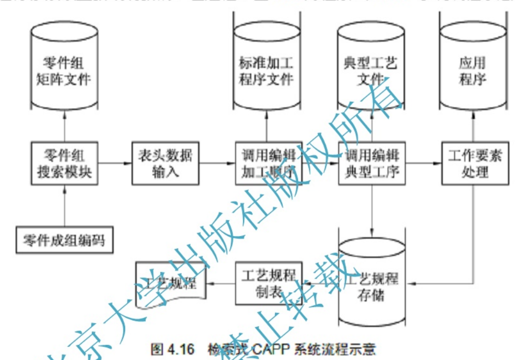


图 4.16　检索式 CAPP 系统流程示意

检索式 CAPP 系统在计算切削用量、工时、加工费用和查询工夹量具信息等方面能显著提高工艺编制的效率，简单实用，而且软件本身的开发和维护费用较低，能在多数中、小型企业中快速推广应用，具有良好的经济效益。

2) 派生式 CAPP 系统

派生式 CAPP 系统又称为变异型或修订型 CAPP 系统。其基本原理是在成组技术的基础上利用零件结构、尺寸和工艺的相似性将零件分成若干零件族，再编制零件族中复合零件的典型工艺并储存在数据库中，当编制新零件工艺规程时，首先根据新零件的成组编码确定其所在的零件族，再根据新零件的具体要求对零件族的典型工艺进行编辑修改后，产生符合要求的新工艺规程，图 4.17 所示为派生式 CAPP 系统流程图。

派生式 CAPP 系统根据零件信息的描述与输入方式不同又分为基于成组技术的 CAPP 系统和基于特征的 CAPP 系统两大类。

拥有科学合理的零件分类编码系统和正确获取零件信息的功能对派生式 CAPP 系统具有至关重要的作用，而复合零件的设计与典型工艺过程的制订则是开发派生式 CAPP 系统的关键。派生式 CAPP 系统工艺原理简单，容易开发，目前企业实际投入运行的 CAPP 系统大多属于该类型，其局限性是柔性差，不能用于全新结构零件的工艺设计。

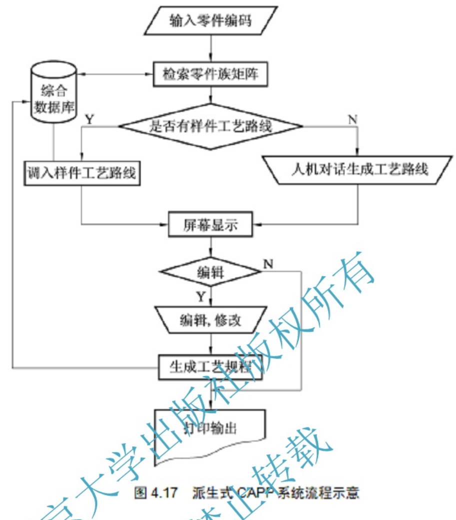


图 4.17 派生式 CAPP 系统流程示意

3) 创成式 CAPP 系统

创成式 CAPP 系统又称为生成式 CAPP 系统，其基本原理是根据零件输入的全面特征信息和工艺数据库的信息(如各种加工方法、加工对象、加工设备及刀具的适用范围等)在没有人工干预下，运用一定的逻辑原理、规则、公式和算法自动的“创成”一个新的优化的工艺过程。创成式 CAPP 系统的自动化与智能化程度要高于派生式 CAPP 系统，它没有事先设置的典型工艺过程，具有较多的机动决策功能，克服了派生法不能适用全新零件的缺点，图 4.18 为创成式 CAPP 系统的流程图。

零件加工工艺过程的创成，就是按工艺逻辑推理以确定零件各型面特征的最终精加工的工艺方法及其加工链(一个或一组表面的加工工序序列)。加工链反映了工艺生成过程的逆向推理过程，也反映了工艺设计人员长期积累的实际经验。因此，创成式 CAPP 系统的核心是工艺设计的决策推理过程和加工链的确定，目前常用的决策方法有决策树法、决策表法、基于知识的决策法、基于规则的推理法以及基于框架的推理法等。

由于产品品种的多样性及生产制造的复杂环境等因素，使得工艺设计的决策过程错综复杂，难以建立实用的数学模型和通用算法，目前还不能开发出通用的创成式 CAPP 系统。

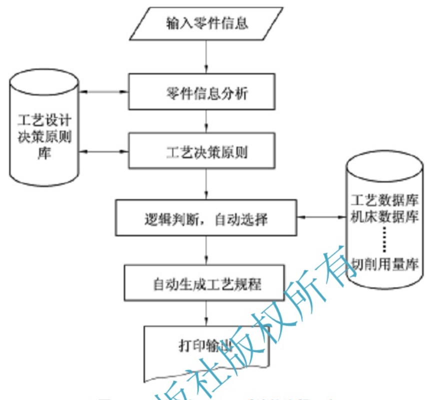


图 4.18 创成式 CAPP 系统的流程示意

4) 智能式 CAPP 系统

智能式 CAPP 系统是人工智能中的专家系统技术在工艺设计中的应用。一般来说智能式 CAPP 系统具有知识库、推理机、解释机、动态数据、零件信息获取模块、人机接口模块、图形处理模块、工艺文档管理和输出模块。在设计一个零件工艺规程时不像一般 CAPP 系统那样，在程序运行中直接生产工艺规程，而是根据输入信息，频繁地访问知识库，并通过推理机中的控制策略，从知识库中搜索能处理当前问题的规则，然后执行这条规则，并把每次执行规则得到的结论部分按先后次序记录下来，直到零件加工达到一个终结状态。图 4.19 为智能式 CAPP 系统的流程图。

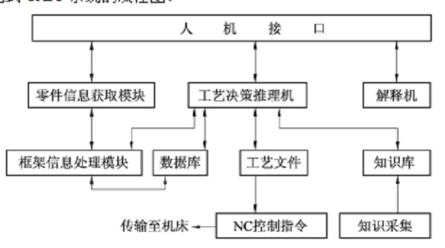


图 4.19 智能式 CAPP 系统的流程示意

4.3.4 CAPP 的发展方向和特点

目前 CAPP 系统的研究与开发，仍然受到较多因素的制约，如大多数实用的应用系统的功能和范围小、系统的开发处于低水平的重复，难以解决零件信息的描述和获取、决策逻辑推理及规则的制定、模型化和算法化、各种制造工程数据库的建立和维护等问题，这些都严重制约 CAPP 系统的发展，直至近几年国内外还没有开发出兼具实用性和通用性的自动工艺设计的 CAPP 系统，但是多年来积累了大量宝贵的经验。

随着制造业的信息化以及制造技术的进步，近年来商品化的 CAPP 系统需要普及应用，对 CAPP 系统提出了较高要求。在这种形势下，CAPP 技术和系统的发展趋势主要表现在集成化、网络化、知识化、智能化、工具化、工程化、交互式和渐进式等方面。

1．集成化、网络化方向

集成化是 CAPP 的一个重要发展方向。所谓集成化就是 CAD/CAPP/CAM/CAE 的局部集成。CAPP 与 CAD 系统的集成，与 CAM 系统的集成，在集成化系统中采用统一的数据交换标准，从根本上解决了 CAPP 系统的零件信息的描述与获取问题，提高了自动化水平。

20 世纪 90 年代至今，直接从二维的或三维的 CAD 设计模型获取工艺输入信息，开发基于知识库和数据库、关键环节采用交互式设计方式并提供参考工艺方案的 CAPP 工具系统。此类系统在更高的层次上致力于加强 CAPP 系统的智能化工具能力，为 CAD/CAPP/CAM/CAE 的集成提供全面基础。

网络化是现代系统集成应用的必然要求，如产品设计信息、工艺路线设计和原材料计划由网络上的工厂级计算机完成，而工序设计、NC 编程则由网络上的车间级计算机完成，企业内工程数据库和决策逻辑的知识库等分布在整个企业中；CAPP、CAD、CAM 及 CAE 等系统的集成应用都需要网络技术支撑，如与产品设计实现双向的信息交换与传递，与生产计划调度系统实现有效集成，与质量控制系统建立内在联系等。只有实现网络化才能实现企业级乃至更大范围的信息化。

为实现集成化的目标，必须解决以下一些问题。

(1) 建立以特征建模为基础的通用产品及零件模型，从根本上解决零件的描述和获取问题。采用特征建模技术还能将预算、设计、生产和销售数据相互联系起来而形成一个统一的基础信息库，因此也是整个 CMIS 系统集成化的基础。

(2) 探索各种加工法的加工能力、各种生产环境约束条件的有效表达方法和数据结构，从而建立统一的工程数据库。

(3) 解决各种工艺决策逻辑的模型化、算法化问题，建立各种工艺过程设计的优化决策模型、经济模型，建立易扩充、修改和维护的工艺决策知识库系统。

(4) 探索各种叙述性模块、过程模块及各种实用处理工具模块的有效系统结构。

2．知识化、智能化方向

传统 CAPP 系统主要以解决事务性、管理性工作为主要任务。而基于知识化、智能化的 CAPP 系统除了作为工艺辅助工具外，还有将工艺专家的经验和知识积累起来建立公用工艺数据与知识库并加以充分利用的任务。在知识化的基础上，CAPP 系统应该从实际出发，结合工艺设计在工序、特征形体层面或在全过程中提供备选的工艺方案，并根据操作

者的工作记录进行各种层次的自学习、自适应。目前人工智能已广泛应用于各种类型的 CAPP 系统中，并且还可将神经元网络理论及基于实例的推理等方法用于 CAPP 系统。

3．工具化、工程化方向

各企业的工艺环境管理模式千差万别，从既要使用各企业的具体环境，又要控制针对具体企业的实际工作量、提高通用性方面考虑，需要加强 CAPP 系统的工具化和工程化，使 CAPP 系统的工艺设计的共性(包括推力控制策略、公共算法以及通用的、标准化的工艺数据与工艺决策知识)与工艺设计的个性(包括与特定加工环境相关的工艺数据及工艺决策知识等)完全独立，使 CAPP 系统具有工具化思想的通用性。可以允许用户对现有的 CAPP 系统进行二次开发，将 CAPP 系统的功能分解成一个个相对独立的工具，用户能根据企业的具体情况输入数据和工艺知识，形成面向特定的制造和管理环境的 CAPP 系统。

特别提示

在工程化方面，必须要考虑用户现有的生产环境和制造模式，合理的构建适合于企业自身的 CAPP 系统，此外还有必要对国家、国际标准和先进制造技术等因素进行分析，结合各类企业工艺的具体需求，引导企业的工艺活动，促进工艺活动的规范化，从而规范 CAPP 系统的实施过程，使大部分企业使用的 CAPP 系统是主体相似的工程产品而不是个性的艺术品。

4．交互式、渐进式方向

CAPP 系统主要用来帮助而不是取代工艺设计人员，一个实用、通用的 CAPP 工具系统不宜追求完全的自动化，需要有与操作人员交互的功能。操作人员要有足够的工艺知识和判断能力，并有能力帮助 CAPP 系统做出关键决策。决策、判断对具备足够工艺判断能力的工艺人员来说不是很困难很繁琐的工作，但对计算机而言可能难以胜任。因此需要逐步建立、验证、完善知识库及其使用法则，需要有目标、有计划的渐进式发展商品化的、基于知识的 CAPP 工艺系统。

4.4　其他有助于提高劳动生产率的加工方法

随着科学技术的发展，近几十年出现了许多先进机械制造技术和方法，显著提高了劳动生产率，除上述成组技术和计算机辅助工艺规程设计外，还有计算机辅助制造、计算机集成制造系统、柔性制造系统等。在本节将作简要介绍。

4.4.1　计算机辅助制造

计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing，CAM)就是用分级计算机来控制机械制造过程的各个环节。计算机辅助制造系统是由硬件和软件组成的。硬件包括数控机床、检测装置、数字计算机及其他相关装置。软件是指一个计算机编程系统的联结网，其功能是用来进行监测、处理和最终控制信息流与 CAM 的硬件。

1．计算机在辅助制造系统中的应用

(1) 计算机过程检测：用计算机观察制造过程及相应的设备，并收集和记录工序数据，

作为人工控制过程的指导。

(2) 计算机数字控制(Computer Numerical Control，CNC)：用小型计算机部分或全部代替传统数控机床的专用控制机，称为计算机数字控制。图 4.20 所示为计算机数字控制系统，零件程序输入到小型(或微型)计算机的存储器内，已存在于计算机内的控制软件将零件程序处理后，经接口输入给机床的伺服系统，驱动机床运动。用小型计算机数字控制机床的控制器(如图中虚线方框部分)来代替传统数控机床的控制机。

计算机数字控制系统的柔性是其最大的优点。在生产过程中由于逻辑功能是由计算机程序来实现的，修改和增删程序比较容易，因此扩展系统的功能范围就非常方便。于是可以提高劳动生产率。

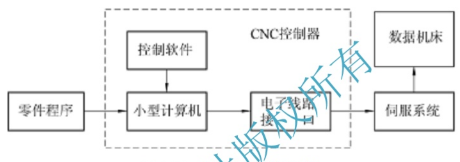


图 4.20　计算机数字控制系统

(3) 直接数字控制(Direct Numerical Control，DNC)：用一台计算机来控制多台数控机床就称为直接数字控制，或称群控。在分时基础上采集各台数控机床的数据，并把指令信息输出给各台数控机床，以保证制造过程正常进行。制造过程的调整可自动进行，不用人工干预。

直接数字控制系统的具体构成如图 4.21 所示。它是由一台计算机和 4 种辅助装置(数控机床、通讯线、主体记忆装置和控制台)构成的。主体记忆装置就是用来储存多种零件的数控加工指令、日程计划等各方面数据的装置。控制台设置在机床群间，操作者使用控制台的键盘等工具就可与远距离的计算机对话、交流信息。把计算机与辅助装置连接起来就是通信线。

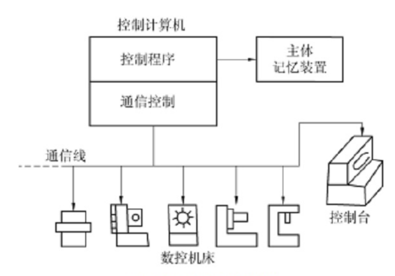


图 4.21　DNC 系统构成

DNC 系统不仅用于数控加工，也可用于利用输送装置将数控机床、自动仓库、工具及夹具管理室相连接，而且工件的装夹、取出和清理能自动进行的系统。

(4) 适应控制(Adaptive Control，AC)：由于数控机床只能按照预定的程序进行加工，而实际的加工情况并不完全与编程时所设想的完全一样。据估计大约有 30 种变量直接或间接地影响切削过程，诸如工件毛坯余量不均匀、材料硬度不一致；刀具在切削过程中变钝；刀具几何参数发生变化；工件在切削过程中变形；以及热传导、润滑、冷却等。当切削条件变化时数控系统不能及时作出反应，而仍是原封不动地按规定程序动作，结果不是刀具损坏就是工件报废。因此只能在编程时采取保守的切削用量，这不仅降低了生产率，也影响加工一批零件时精度的一致性。为克服这一缺陷，在数控机床上采用适应控制系统。

适应控制就是按事先给定的评价指标，自动改变加工系统的参数(如切削用量等)，使结果尽可能接近给定的指标。图 4.22 所示为适应控制数控系统，该系统可用各种传感器测出加工过程中机床的温度、扭矩、振动、位移、刀具磨损等信息，与事先由实验得到的最佳参数比较，若有误差，则通过指令自动修正，以达到最佳的控制效果。



图 4.22　适应控制数控系统

2. 计算机辅助制造的数据库

数据库就是存放从各方面收集到的大量数据的仓库。按不同的应用领域分别收集了大量按一定格式编好的数据，并将它们储存于大型计算机的存储器中，形成数据库供用户共享。它具有数据检索和存取功能；还可对数据进行修改、增删和整理。

CAM 数据库的内容和复杂程度取决于系统所进行的作业量。理想的 CAM 系统需要一个庞大的数据库。对目前可行的 CAM 系统来讲，数据库所包含的内容如下：设计数据、加工数据、切削参数数据、质量控制数据、生产进度表、监控数据和管理报告等。

3. 计算机辅助设计与计算机辅助制造一体化

计算机辅助设计(Computer Aided Design，CAD)与计算机辅助制造的软件系统是分别研制和发展起来的。生产实践要求设计与制造一体化，即 CAD 与 CAM 相结合用 CAD/CAM 表示。由于 CAD 能建立数据库，以提供制造使用的数据，在理想的 CAD/CAM 系统中，产品设计与制造间建立直接的联系。CAD/CAM 的目标不但要实现设计与制造的各段自动化，而且还要实现从设计到制造的过渡自动化。这样从根本上改变传统的设计与制造相互分离，既费时间又使设计与工艺人员重复劳动。

在 CAD/CAM 一体化的系统中，至少对于某些形状的零件直接可以从设计数据进行数

控编程。因此，有人曾预测：到本世纪末，先进的机械制造单位可以甩掉图样这一传统的“工业语言”，而由计算机处理信息流的过程来代替。这样一定可以大大提高劳动生产率。

4.4.2　计算机集成制造系统

20世纪70年代中期，随着市场的进一步全球化，世界工业市场竞争不断加剧，给企业带来了巨大的压力，迫使企业纷纷寻求有效方法，加速推出高性能、高可靠性、低成本的产品，以期更有力地参与竞争。计算机的产生、发展及其在工业中的广泛应用，使机械工业的传统生产方式孕育着一次新的技术革命，这次技术革命的主要特征是由局部自动化走向全局自动化，即由原来局限于产品制造过程的自动化发展到产品设计过程、生产过程和经营管理过程的自动化，由此即出现了计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System，CIMS)。

1. CIM和CIMS的含义

CIM是一种概念、一种哲理，它是用来组织现代工业生产的指导思想，是1974年由美国学者约瑟夫·哈林顿(Joseph Harrington)在其所著的*Computer Integrated Manufacturing*一书中提出的。哈林顿提出的CIM概念包含两个基本的观点：其一是企业生产的各个环节，从市场分析、产品设计、加工制造、经营管理到售后服务的全部生产活动，是一个不可分割的整体，彼此紧密连接，单一的生产活动都应在企业整个框架下统一考虑，其二是整个生产过程实质上是一个数据的采集、传递和加工处理的过程，最终的产品可看做是数据的物质表现，可进一步阐述如下。

(1) 企业生产的各个环节，即市场分析、经营决策、管理、产品设计、工艺规划、加工制造、销售、售后服务等全部活动过程是一个不可分割的有机整体，要用系统的观点进行协调，进而实现全局优化。

(2) 企业生产的要素包括人、技术及经营管理。其中，尤其要继续重视发挥人在现代化企业生产中的主导作用。

(3) 企业生产活动包括信息流(采集、传递和加工处理)及物流两大部分。现代企业中尤其要重视信息流的管理运行及信息流与物流间的集成，对于CIMS中的M，不仅仅是意味着制造，还应扩展到管理(Management)领域。

(4) CIM技术是基于现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术及系统工程技术的一门综合性技术。具体地讲，它综合并发展了与企业生产各环节有关的计算机辅助技术，即计算机辅助经营管理与决策技术(MIS，即Management Information System，管理信息系统，OA，MRP)，计算机辅助分析与设计技术(CAD、CAE、CAPP、CAM)，计算机辅助制造技术(DNC、CNC、工业机器人、FMC、FMS)，计算机辅助信息集成技术(网络、数据库、标准化、CASE、AI)，计算机辅助建模、仿真、实验技术，计算机辅助质量管理与控制等。

计算机集成制造系统(CIMS)是基于CIM这种生产理念而产成的系统，是CIM的具体体现，是自动化生产的系统工程。计算机集成制造系统(CIMS)是工厂自动化的发展方向，是一种企业实现整体优化的理想模式，通过计算机及其软件将全部生产活动所需的各分散系统有机地集成起来，是适合于多品种、中、小批量生产的总体高效益及高柔性的智能制造系统，也是指导未来产品生产的哲理。是提高劳动生产率的重要方法之一。

2. 集成制造系统的层次结构

CIMS 的关键是集成问题，但集成不是简单的组合，在机械厂这种多层次多环节的离散型生产系统中，各个子系统都是分散地随机地运行。由于各个子系统处理数据和信息的能力有限，因此如何划分层析结构，正确处理集中和分散的关系并有效地集成是 CIMS 的关键。这就需要建立一个与生产系统中各功能子系统连接起来的集成信息系统(集成数据库，用以保证企业各功能子系统所用信息数据的一致性、准确性、及时性和共享性)。一个企业可以由公司、工厂、车间、单元、工作站、设备 6 层组成，其职能分别为计划、管理、协调、控制及运行。在最高层公司和工厂层，有大量抽象信息和不确定性信息，其信息处理的周期长，越往下层，如设备层，信息越具体，有时的实时信息甚至以毫秒、微秒来计算。计算机集成制造就要在这样一个十分广阔的信息范围内将其集成起来，进行数据的采集、通信和处理，因此，在集成制造系统中，计算机是采用分级管理的，图 4.23 表示了计算机集成制造系统的简要结构框图。

从图 4.23 中可以看出，CIMS 的结构是层次性的结构。最高层是经营决策层，是 CIMS 的核心；其次是设计计划层，此层可划分为两大部分，一部分是产品的计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)，另一部分是组织准备和管理，它是系统的支柱；作业层、FMS 与生产单元层是产品生产实施的层次，是系统的基础。图中的箭头表示了 CIMS 各个层次的计算机之间的信息交换，最重要的信息将汇总到决策层，作为决策的依据，所以系统的计算机网络是系统的神经系统。MIS 系统贯穿 CIMS 各个层次，它的效率将决定产品生产是否能高效高质，以满足市场需求。

在 CIMS 中的一项关键技术就是解决 CAD/CAPP/CAM 的一体化问题，以及如何将设计、工艺和制造三者有机地集成起来，这一技术的解决有赖于对产品模型、数据交换标准和智能制造等先进技术的研究。目前，国内外都非常重视上述技术的研究和开发，并已取得了许多有应用价值的成果。

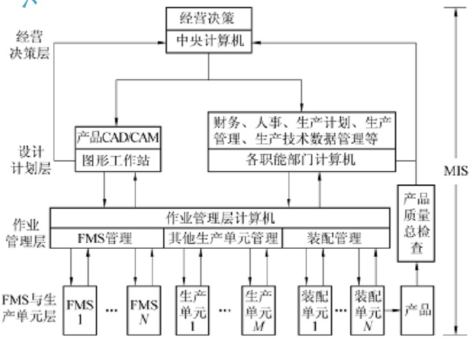


图 4.23　CIMS 简要结构框图

3．集成制造系统的组成

CIMS一般由4个功能分系统和两个支撑分系统构成。图4.24表示CIMS六个系统及其与外部信息的联系。4个功能分系统分别是管理信息分系统、产品设计与制造工程设计自动化分系统、制造自动化(柔性制造)分系统、质量保证分系统；两个支撑分系统为计算机网络系统及数据库系统。企业在实施CIMS时，应根据企业自身的需求和条件，分步或局部实施。

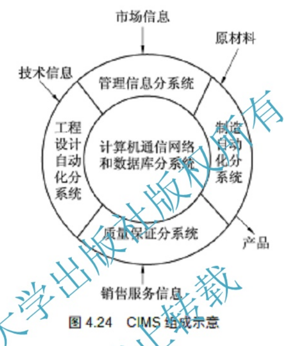


图4.24　CIMS组成示意

1) 管理信息系统(MIS)

管理信息系统是以制造资源计划MRP-Ⅱ(Manufacturing Resource Planning)为核心,包括预测、经营决策、各级生产计划、生产技术准备、销售、供应、财务、成本、设备、工具、人力资源等管理信息功能，通过信息集成，达到缩短产品生产周期、降低流动资金占用率，提高企业应变能力的目的。因此，必须认真分析生产经营中物质流、信息流和决策流的运动规律，研究它们与企业各项经营、生产效益目标的关系，对企业生产经营活动中产生的各种信息进行筛选、分析、比较、加工、判断，从而实现信息集成与信息优化处理，保障企业能够有节奏、高效率地运行。管理信息系统有下列特点。

(1) 它是一个一体化的系统，把企业中各个子系统有机地结合起来。

(2) 它是一个开放系统，它与CIMS的其他分系统有着密切的信息联系。

(3) 所有的数据来源于企业的中央数据库(这里是指逻辑上的)，各子系统在统一的数据环境下工作。

2) 产品设计与制造工程设计自动化系统

它是指计算机辅助产品设计、制造准备以及产品性能测试等阶段的工作，通常称为CAD/CAPP/CAM系统。它可以使产品开发工作高效、优质地进行。

(1) CAD系统包括产品结构的设计，定型产品的变型设计及模块化结构的产品设计。

CAD系统应具备以下主要功能。

第一，产品方案设计的专家系统，该系统是将成熟的产品设计原则、方法等通过知识

库形式存在计算机中，需要时可以调用并进行推理决策。应用该系统能使不熟练的设计人员设计出好的产品方案，但计算机不能自动产生新的设计原则和方法，所以系统需要不断地随技术进步而更新扩展。

第二，工程分析计算(Computer Aided Engineering，CAE)，即计算机辅助工程。

第三，几何特征造型。目前几何造型是三维立体造型，并能涂色，立体感很好。通过立体造型可以使设计人员在产品还未生产出来之前就可以通过屏幕看到未来的产品。但是，几何造型没有考虑到工艺问题。特征造型的研究方向是在设计造型时将工艺因素也考虑进去，以便真正实现 CAD/CAPP/CAM 完全自动化。

第四，计算机绘图和文档编辑。几何造型后的零件通过投影转换可以变成视图、剖面图等，然后通过人机对话的方式标注尺寸、文字，成为产品设计图。产品设计图是通过计算机的外围设备绘图机自动绘制出来的。

第五，工程信息的有效存储。管理和共享，本项内容是工程数据库管理以及如何通过计算机网络与企业各部门(甚至外界)互相使用信息。

(2) CAPP 系统需要完成计算机按设计要求将原材料加工成产品所需要的详细工作指令的准备工作。

(3) CAM 系统通常进行刀具路径的规划、刀位文件的生成、刀具轨迹仿真以及 NC 代码的生成。

产品设计和制造过程，设计自动化系统在接到管理信息系统下达的产品设计指令后，进行产品设计、工艺过程设计和产品数控加工编程，并将设计文档、工艺规程、设备信息及工时定额送给管理信息系统，将 NC 加工等工艺指令送给制造自动化系统。

3) 制造自动化系统

它是在计算机的控制与调度下，按照 NC 代码将毛坯加工成合格的零件并装配成部件或产品。制造自动化系统的主要组成部分有：加工中心、数控机床、运输小车、立体仓库及计算机控制管理系统等。

4) 质量保证系统

通过采集、存储、评价及处理存在于设计、制造过程中与质量有关的大量数据，从而提高产品的质量。

5) 两个支撑系统

(1) 网络系统。它是支持 CIMS 各个系统的开放型网络通信系统，采用国际标准和工业标准规定的网络协议(如 MAP，TCP/IP)等，可实现异种机互联，异构局域网及多种网络的互联，满足各应用分系统对网络支持服务的不同需求，支持资源共享、分布处理、分布数据库、分层递阶和实时控制等。

(2) 数据库系统。它支持 CIMS 各分系统，覆盖企业全部信息，以实现企业的数据共享和信息集成。通常采用集中与分布相结合的三层递阶控制体系结构——主数据管理系统、分布数据管理系统和数据控制系统，以保证数据的安全性、一致性及易维护性等。

4. 集成制造系统的特征

目前在世界范围内 CIMS 正在不断地发展，人们对 CIMS 的认识也正在不断深化。至今，对 CIMS 的发展还没有形成一种统一的模式，但集成制造作为一种制造哲理，已被广

泛接受。尽管 CIMS 的发展还没有固定的模式，但从 CIMS 已走过的发展道路来看，CIMS 具有如下一些基本特征。

(1) CIMS 包含了现在已经被制造企业采用的各种自动化单元技术。如加工制造过程的自动化技术(FMS)；产品设计过程的自动化技术,如 CAD/CAM；生产管理过程的自动化技术,如物料需求计划 MRP(Material Requirements Planning)和全面质量控制 TQC (Total Quality Control)等。

(2) CIMS 的集成，必须高度依赖于计算机网络及分布式数据库。CIMS 的关键之一是必须建立一种适用于工厂自动化的网络标准(如 TOP/MAP)和数据交换标准(如 IGES、STEP)，并建立一个在逻辑上是全局性的，在物理上是分布性的综合数据库。

(3) CIMS 特别强调提高企业经营管理效率，并使之与企业中其他单元系统相互协调集成。因此，CIMS 比工厂自动化(FA)具有更广泛的内涵。

(4) CIMS 是一个复杂的大系统，技术复杂，投资大，周期长，风险也大。为了设计 CIMS，必须建立一整套自上而下的系统设计方法，同时必须按开放式体系结构的原则来设计，以便适应长远发展的需要。

(5) CIMS 十分重视人的作用，尽管 CIMS 是建立在全部制造加工过程的广泛的计算机支持基础上，但系统中人的作用始终是最重要的。

5. 实现 CIMS 的关键技术及我国在 CIMS 方面的进展

1) 实现 CIMS 的关键技术

如前所述，CIMS 是自动化技术、信息技术、生产技术、网络技术、传感技术等多学科技术的相互渗透而产生的集成系统。由于 CIMS 的技术覆盖面太广，因此不可能由某一厂家成套供应 CIMS 技术与设备，而必然出现许多厂家供应的局面。另外，现有的不同技术，如数据库、CAD、CAPP、CAM 及计算机辅助质量管理(Computer Aided Quality，CAQ)等是按其应用领域相对独立地发展起来的，这就带来不同技术设备和不同软件之间的非标准化问题。而标准化及相应的接口技术对信息的集成是至关重要的。目前世界各国在解决软、硬件的兼容问题及各种编程语言的标准、协议标准、接口标准等方面做了大量工作，开发了如 MAP/TOP、IGES、STEP 等软件。

实现 CIMS 的另一个关键技术在于数据模型、异构分布数据管理系统及网络通信问题。这是因为一个 CIMS 涉及的数据类型是多种多样的，有图形数据、结构化数据(如关系数据)及非图形、非结构化数据(如 NC 代码)。如何保证数据的一致性及相互通信问题是一个至今没有很好解决的课题。现在人们探讨用一个全局数据模型，如产品模型来统一描述这些数据，这是未来 CIMS 的重要理论基础和技术基础。

第三个关键技术在于系统技术和现代管理技术。对这样复杂的系统如何描述、设计和控制，以便使系统在满意状态下运行，也是一个有待研究解决的问题。CIMS 会引起管理体制变革，所以生产规划、调度和集成管理方面的研究也是实现 CIMS 的关键技术之一。

2) 我国在 CIMS 方面的进展

各国高新技术的发展水平已成为衡量一个国家综合国力及其国际地位的主要标志。为跟踪国际高新技术的发展，参与国际竞争，我国在 1986 年 3 月制订了国家高技术研究发展计划(即“863”计划)。在这个计划中，明确地将计算机集成制造系统确定为自动化领域的研究主题之一。这对我国制造业工厂自动化技术的导向既有长远意义又有现实意义。

国家 CIMS 工程技术研究中心全称：国家计算机集成制造系统工程技术研究中心，英文名称：National CIMS Engineering Research Center，简称 CIMS 工程研究中心，或 CIMS-ERC。CIMS 工程研究中心是国家科技部于 1992 年批准组建的第一批国家工程研究中心，1995 年通过验收，并正式挂牌。

在 21 世纪初，我国 863/CIMS 主题战略目标是：在一批企业实现各有特色的 CIMS，并取得综合效益，促进我国的 CIMS 高技术产业的形成，建立先进的研究开发基地，攻克一批关键技术，造就一批 CIMS 人才，以 CIMS 技术促进我国制造业的现代化。为了实现这个战略目标，863/CIMS 主题按 4 个层次、10 个专题进行研究和开发。

4 个层次为应用工程、产品开发、技术攻关和应用基础研究。每个层次有不同的目标、评价指标和运行方式，各层次之间相互衔接，互为支持，形成一个有机整体。其中应用工程是重点，选择了包括飞机、机床、鼓风机、纺织机、汽车、家电和服装等部门企业作为应用工厂，开展典型 CIMS 应用系统的开发。

10 个专题为：CIMS 总体设计与实施、CIMS 发展战略及体系结构、CIMS 总体集成技术、集成产品设计自动化系统、集成工艺设计自动化系统、集成制造自动化系统、CIMS 管理与决策支持系统、集成质量控制系统、计算机网络与数据库系统以及 CIMS 系统技术与方法 10 个方面。

10 年来，我国 863/CIMS 主题在“效益驱动、总体规划、重点突出、分步实施”十六字方针的指导下，CIMS 在我国的研究、开发与应用取得了重大进展，完成了一批 CIMS 前沿技术的研究，开发了一批具有实用价值的 CIMS 工具产品，建立了 10 多个典型 CIMS 应用工程。

国家 CIMS 工程技术研究中心全称：国家计算机集成制造系统工程技术研究中心，英文名称：National CIMS Engineering Research Center，简称 CIMS 工程研究中心，或 CIMS-ERC。CIMS 工程研究中心是国家科技部于 1992 年批准组建的第一批国家工程研究中心，1995 年通过验收，并正式挂牌。

总体来说，我国 CIMS 的发展经历了 3 个阶段：由 863/CIMS 主题确立时“CIMS 离我们还很远”的初始阶段，到典型 CIMS 示范企业建立时“CIMS 正向我们走来”的第二阶段，发展到目前“CIMS 就在我们身边”的推广应用阶段。CIMS 技术的进步和发展，为我国小面积推广应用、继续跟踪国际先进技术打下了良好的基础。

此外，CIMS 作为新型的生产模式，其本身也处于不断的发展和更新当中，并且有着非常强的应用前景，制造业实际的变化和需要也会推动 CIMS 的研究和发展。人们围绕 CIMS 的总目标，将并行工程、精良生产、敏捷制造、智能制造、虚拟制造、绿色制造，以及全球制造等许多新概念、新思想、新技术、新方法引入到 CIMS 当中来。这些新的制造理念都有其自身特有的生产过程组织形式，并与特定的生产管理方法相联系，形成人、技术、管理的全面集成。同时这些新的制造理念的提出和研究应用也推动了 CIMS 的发展，使制造业展现出前所未有的新的发展局面。

4.4.3　柔性制造系统

柔性制造系统(Flexible Manufacturing System，FMS)是由统一的信息控制系统、物料储运系统和一组数字控制加工设备组成的，能适应加工对象变换的自动化机械制造系统。图 4.25 所示为东芝 FMS 立体外观。



图 4.25 东芝 FMS 立体外观

1. 柔性制造系统分类

柔性制造系统可以分为柔性制造单元、柔性制造系统、柔性自动生产线 3 种类型。

1) 柔性制造单元

柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell，FMC)是在制造单元的基础上发展起来的具有柔性制造系统部分特点的一种单元。通常由一台具有零件缓冲区、换刀装置及托板自动更换装置的数控机床或加工中心与工件储存、运输装置组成，具有适应加工多品种产品的灵活性和柔性，可以作为加工中 FMS 的基本单元，也可将其视为一个规模最小的 FMS，是 FMS 向廉价化及小型化方向发展的产物。

2) 柔性制造系统

柔性制造系统是以数控机床或加工中心为基础，配以物料传送装置组成的生产系统。FMS 通常包括两台或两台以上的 CNC 机床(或加工中心)，由集中的控制系统及物料系统连接起来，该系统由电子计算机实现自动控制，可在不停机的情况下实现多品种、中小批量的加工管理。FMS 是使用柔性制造技术最具代表性的制造自动化系统。柔性制造系统适合加工形状复杂，加工工序多，批量大的零件。其加工和物料传送柔性大，但人员柔性仍然较低。

3) 柔性自动生产线

柔性制造生产线 (Flexible Manufacturing Line，FML)是把多台可以调整的机床(多为专用机床)连接起来，配以自动运送装置组成的生产线。该生产线可以加工批量较大的不同规格零件。柔性程度低的柔性制造生产线在性能上接近大批量生产用的制造生产线；柔性程度高的柔性制造生产线接近于小批量、多品种生产用的柔性制造系统。

2. 柔性制造系统的构成

就机械制造业的柔性制造系统而言，如图 4.26 所示为柔性制造系统构成，其基本组成部分包括以下几个子系统。

(1) 加工子系统：指以成组技术为基础，把外形尺寸(形状不必完全一致)、重量大致相似，材料相同，工艺相似的零件集中在一台或数台数控机床或专用机床等设备上加工的系统。

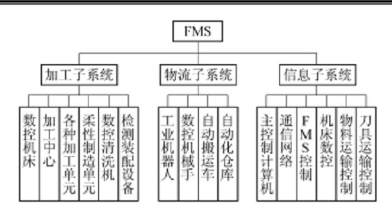


图 4.26　柔性制造系统构成

(2) 物流子系统：指由多种运输装置构成，如传送带、轨道-转盘以及机械手等完成工件、刀具等的供给与传送的系统，它是柔性制造系统主要的组成部分。

(3) 信息子系统：指对加工和运输过程中所需各种信息收集、处理、反馈，并通过电子计算机或其他控制装置(液压、气压装置等)，对机床或运输设备实行分级控制的系统。

3. 柔性制造系统的优点及发展趋势

1) 柔性制造系统的优点

柔性制造系统是一种技术复杂、高度自动化的系统，它将微电子学、计算机和系统工程等技术有机地结合起来，理想和圆满地解决了机械制造高自动化与高柔性化之间的矛盾。具体优点如下。

(1) 设备利用率高。一组机床编入柔性制造系统后，产量比这组机床在分散单机作业时的产量提高数倍。

(2) 减少生产周期。

(3) 生产能力相对稳定。自动加工系统由一台或多台机床组成，发生故障时，有降级运转的能力，物料传送系统也有自行绕过故障机床的能力。

(4) 产品质量高。零件在加工过程中，装卸一次完成，加工精度高，加工形式稳定。

(5) 运行灵活。有些柔性制造系统的检验、装卡和维护工作可在第一班完成，第二、第三班可在无人照看下正常生产。在理想的柔性制造系统中，其监控系统还能处理诸如刀具的磨损调换、物流的堵塞疏通等运行过程中不可预料的问题。

(6) 产品应变能力大。刀具、夹具及物料运输装置具有可调性，且系统平面布置合理，便于增减设备，满足市场需要。

2) 柔性制造系统的发展趋势

随着科学技术水平的日益提高，柔性制造系统将在各种技术发展的推动下继续迅速发展。

(1) 柔性制造系统与计算机辅助设计和辅助制造系统相结合，利用原有产品系列的典型工艺资料，组合设计不同模块，构成各种不同形式的具有物料流和信息流的模块化柔性系统。

(2) 现代企业已经实现从产品决策、产品设计、生产到销售的整个生产过程自动化，特别是管理层次自动化的计算机集成制造系统。在这个大系统中，柔性制造系统作为计算机集成制造系统的重要组成部分，必然会随着计算机集成制造系统的发展而发展。

(3) 构成 FMS 的各项技术，如加工技术、运储技术、刀具管理技术、控制技术以及网

络通信技术的迅速发展，毫无疑问会大大提高 FMS 系统的性能。在加工中采用喷水切削加工技术和激光加工技术，并将许多加工能力很强的加工设备如立式、卧式镗铣加工中心，高效万能车削中心等用于 FMS 系统，大大提高了 FMS 的加工能力和柔性，提高了 FMS 的系统性能。AVG 小车以及自动存储、提取系统的发展和应用，为 FMS 提供了更加可靠的物流运储方法，同时也能缩短生产周期，提高生产率。刀具管理技术的迅速发展，为及时而准确地为机床提供适用刀具提供了保证。同时可以提高系统柔性、设备利用率、降低刀具费用、消除人为错误、提高产品质量、延长无人操作时间并最终提高劳动生产率。

本 章 小 结

本章第一节介绍提高劳动生产率的工艺措施和组织措施；第二节介绍了成组技术的产生背景、基本原理及发展、零件的分类和编码、零件成组分类方法、成组加工工艺的制定、成组生产的组织形式、成组技术的优越性；第三节主要讲 CAPP 技术的产生，CAPP 的组成和基本技术，CAPP 的类型和基本原理，CAPP 的发展方向等内容；第四节介绍了目前常用的计算机辅助制造、计算机集成制造系统、柔性制造系统等有助于提高劳动生产率的先进制造方法。

提高生产率的工艺措施是缩减时间定额，例如缩短基本时间，辅助时间，服务时间等方法。

成组技术(GT)研究如何识别和发掘生产活动中有关事物的相似性，并充分利用它，即把相似的问题归类成组，寻求解决这一组问题的统一的最优方案，以取得所期望的经济效益。

计算机辅助工艺规程设计(CAPP)，是在成组技术的基础上，通过向计算机输入被加工零件的原始数据、加工条件和加工要求，经由计算机处理并自动进行编码、编程，直至最后输出经过优化的工艺路线、工序内容和工艺文件。

按照工艺决策方法的不同，CAPP 系统可分为检索式 CAPP 系统、派生式 CAPP 系统、创成式 CAPP 系统、智能型 CAPP 系统(专家系统)及综合式 CAPP 系统等类型。

CAPP 技术和系统的发展趋势主要表现在集成化、网络化、知识化、智能化、工具化、工程化、交互式和渐进式等方面。

计算机辅助制造，就是用分级计算机来控制机械制造过程的各个环节。

计算机集成制造系统(CIMS)由四个功能分系统和两个支撑分系统构成。四个功能分系统分别是管理信息分系统、产品设计与制造工程设计自动化分系统、制造自动化(柔性制造)分系统、质量保证分系统；两个支撑分系统为计算机网络系统及数据库系统。

柔性制造系统(FMS)是由统一的信息控制系统、物料储运系统和一组数字控制加工设备组成，能适应加工对象变换的自动化机械制造系统。

柔性制造系统有以下三种类型：柔性制造单元、柔性制造系统、柔性自动生产线。

习　　题

(1) 提高劳动生产率的措施有哪些？
(2) 成组技术的基本原理是什么？在实际生产中有什么用？
(3) 简要说明如何制定成组工艺规程？
(4) 什么是 CAPP？其主要功能是什么?
(5) CAPP 有哪些类型？原理分别是什么？
(6) CAPP 技术和系统的发展趋势主要表现在哪些方面？
(7) 计算机在辅助制造系统中有哪些应用？
(8) 集成制造系统的组成？
(9) 柔性制造系统的类型有哪些？

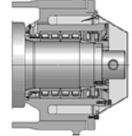
第 5 章　装配工艺基础

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握机械装配相关概念	零件、套件、组件和部件的概念，装配的概念	5%	
掌握机械装配工作内容	清洗、连接、调整、检验和实验	15%	
掌握装配精度的内涵	装配精度与零件精度的关系	5%	
掌握影响装配精度的因素	影响装配精度的因素	5%	
掌握保证装配精度的工艺方法	互换法、选配法、修配法和调整法	20%	
掌握制订装配工艺规程的基本原则	制订装配工艺规程的基本原则	10%	
了解制订装配工艺规程所需的原始材料	图样、生产纲领、生产条件、检验标准	5%	
了解装配的组织形式	固定式装配、移动式装配	5%	
掌握制订装配工艺规程的步骤	装配工艺规程内容和步骤	20%	
了解装配自动化的基本内容	传送自动化；零件定位和定向自动化；清洗、平衡、装入、联接和检测自动化；自动控制	10%	

引例

磨床头架主轴的滑动轴承和主轴的加工精度都符合要求，若装配时其间隙调整得不合适，仍可能使主轴回转精度达不到要求，甚至可能由于间隙过小而产生“咬轴”现象。机器的质量最终是通过装配质量保证的，若装配不当，即使零件的制造质量都合格，也不一定能够装配出合格的产品。



磨床头架主轴装配图

因此，研究和制订合理的装配工艺规程，采用有效的装配方法，对于保证机器的装配精度，提高生产率和降低成本，都具有十分重要的意义。

5.1　概　　述

一部机械产品往往由成千上万个零件组成，装配就是把加工好的零件按一定的顺序和

技术连接到一起，成为一部完整的机械产品，并且可靠地实现产品设计的功能。产品结构设计的正确性是保证产品质量的先决条件，零件的加工质量是产品质量的基础，装配处于产品制造的最后阶段，产品的质量最终通过装配得到保证和检验。因此，装配是决定产品质量的关键环节。研究制订合理的装配工艺，采用有效的保证装配精度的装配方法，对保证进一步提高产品质量有着十分重要的意义。

5.1.1　装配的概念

任何产品都由若干个零件组成。根据规定的技术要求，将零件或部件进行配合和连接，使之成为半成品或成品的过程，称为装配。

一般情况下，机械产品的结构复杂，为保证装配质量和提高装配效率，可根据产品的机构特点，从装配工艺角度出发，将产品分解为可单独进行装配的若干个单元，称为装配单元。装配单元一般可划分为 5 个等级，即：零件、套件(或合件)、组件、部件和机器。如图 5.1 所示为装配单元划分。

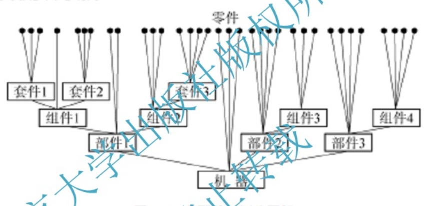


图 5.1　装配单元划分图解

零件是组成产品的最小单元，它由整块金属或其他材料制成。机械装配中，一般先将零件装成套件、组件或部件，然后再装至成产品。

套件是在一个基准零件上装一个或若干个零件构成的，它是最小的装配单元。套件中唯一的基准零件是为了连接相关零件和确定各零件的相对位置。为套件而进行的装配称套装。套件因工艺或材料问题，分成零件制造，但在之后的装配中可作为一个零件，不再分开，如图 5.2 所示的双联齿轮。

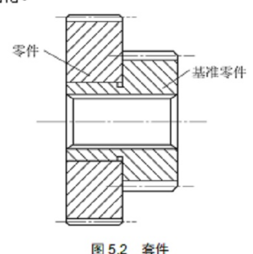


图 5.2　套件

组件是在一个基准零件上，装上若干个套件及零件构成的。组件中唯一的基准零件用于连接相关零件和套件，并确定它们的相对位置。为形成组件而进行的装配称组装。组件中可以没有套件，即由一个基准零件加若干个零件组成，它与套件的区别在于组件在以后的装配中可拆。如机床主轴箱中的主轴组件，如图 5.3 所示。

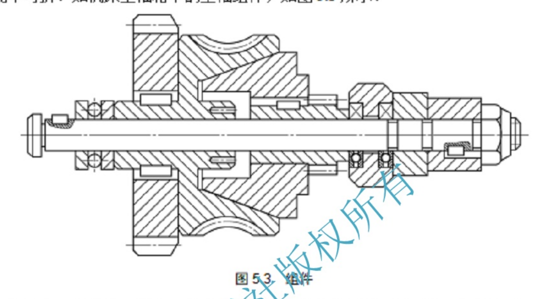


图 5.3　组件

部件是在一个基准零件上，装上若干组件、套件和零件而构成的。部件中唯一的基准零件用来连接各个组件、套件和零件，并决定它们之间的相对位置。为形成部件而进行的装配称部装。部件在产品中能完成一定的完整的功用，如机床中的主轴箱。

机器或称产品，是由上述全部装配单元结合而成的整体。

由图 5.1 可见，同一等级的装配单元在进入总装前互不相关，故可同时进行装配，实行平行作业。在总装时，只要选定一个零件或部件作为基础，首先进入总装，其余零部件相继就位，实行流水作业，这样，就可以合理地使用劳动力和装配场地，缩短装配周期，提高劳动生产率。

5.1.2　装配工作基本内容

装配是机器制造的最后一个阶段，它占有非常重要的地位，因为产品的质量最终是由装配保证的。装配不仅是指合格零部件的简单结合过程，而且是根据各级部装和总装的技术要求，在装配过程中通过清洗、连接、调整和检验等方法来保证产品质量的复杂过程。质量不好的装配，即使采用高质量的零件，也会装出质量较差甚至不合格的产品，对装配工作必须给予足够的重视。常见的装配工作主要有以下几项。

1. 清洗

主要目的是去除零件表面或部件中的油污及机械杂质。机械产品的清洗有利于保证产品的装配质量和延长产品的使用寿命，尤其是对于轴承、密封件、相互接触或相互配合的表面以及有特殊清洗要求的零件，稍有杂物就会影响到产品的质量。所以装配前对零件进行清洗是非常重要的一个环节。

零件的清洗方法有擦洗、浸洗、喷洗和超声波清洗等。清洗液一般用煤油、汽油、碱

液及各种化学清洗液。此外，还应注意使清洗过的零件具有一定的中间防锈能力。

2. 连接

将两个或两个以上的零件结合在一起的工作称为连接。装配中的连接方式往往有两类：可拆连接和不可拆连接。

可拆连接指在装配后可方便拆卸而不会导致任何零件的损坏，拆卸后还可方便地重装。如螺纹连接、键连接和销连接等。

特别提示

在机械加工中，用得最多的是螺纹连接，连接时应注意根据被连接零件的形状和螺栓分布情况合理确定各螺栓的拧紧顺序并且拧紧力矩要均匀，以免引起被连接件的变形。对重要螺纹还要规定拧紧力矩的大小，用指针式扭力扳手来拧紧。

不可拆连接指装配后一般不再拆卸，若拆卸往往损坏其中的某些零件。如过盈配合、焊接、铆接等。

特别提示

其中过盈配合常用于轴和孔的连接，连接方法有压入法(用于过盈量不太大时)、热胀法和冷缩法(用于过盈量较大或重要、精密的机械)。

3. 调整

装配中的调整工作是指相关零部件相互位置的具体调节工作。包括调整零部件的位置精度；调整运动副的间隙，如轴承间隙、齿轮与齿条的啮合间隙；调整某些工作间隙，如柴油机气门间隙(接管与气门杆顶端的间隙)等。调整包含平衡、校正、配作等。

(1) 平衡指对产品中旋转零、部件进行平衡，以防止产品使用中出现振动。

对于转速高、运转平稳性要求高的机器(如精密磨床、内燃机、电动机等)，为了防止在使用过程中，因旋转件的质量不平衡产生的离心惯性力引起振动，装配时必须对有关旋转零件进行平衡，必要时还要对整机进行平衡。部件和整机的平衡要以旋转零件的平衡为基础。

旋转体的不平衡是由体内质量分布不均匀引起的，为消除质量分布不均匀引起的静力不平衡和力偶不平衡，生产中有两种平衡方法：静平衡法和动平衡法。对于长度比直径小很多的圆盘类零件一般采用静平衡(如飞轮和皮带轮等)，而对于长度较大的零件如机床主轴、电机转子等则要用动平衡(如机床主轴，内燃机曲轴，汽轮机主轴等)。不平衡的质量可用以下方法使之平衡。

① 加重法　用补焊、粘接、螺纹连接等方法加配质量。

② 减重法　用钻、锉、铣、磨等加工方法去除质量。

③ 调节法　在预制的槽内改变平衡块的位置和数量。

(2) 校正就是在装配过程中通过找正、找平及相应的调整工作来确定相关零件、部件的相互位置关系，达到装配精度要求。校正在产品总装和大型机械的基体件装配中应用较多。例如在普通车床总装中，床身安装水平及导轨扭曲的校正，低速重型柴油机的机座上平面的平面度校正，低速重型柴油机活塞在汽缸内与曲轴中心线垂直度的校正等。

校正时常用的工具有平尺、角尺、水平仪、光学准直仪、千分表以及相应的检验棒、过桥等。

(3) 配作指两个零件装配后固定其相互位置的加工，如配钻、配铰等。亦有为改善两零件表面结合精度的加工，如配刮、配研及配磨等。配作一般需与校正调整工作结合进行。

如连接两零件的销钉孔，就必须待两零件的相互位置找正确定后再一起钻铰销钉孔，然后打入定位销钉。这样才能确保其相互位置正确。

配刮多用于运动副的配合表面精加工以提高运动精度，也用于提高固定结合面的接触精度。配刮时，将配合面涂上红丹油，然后使运动副作相对运动，根据配合表面的接触情况将高点刮去。如此多次反复后即可提高两接合面之间的接触精度和运动副的运动精度。此外，刮削过的表面还有利于润滑油的储存，因而有利于提高零件的耐磨性。因此在机器的装配和修理中经常用到配刮。但刮削生产率低，劳动强度大，应尽量“以刨代刮、以磨代刮”。

特别提示

应当指出，配作是在校正、调整的基础上进行的，只有经过认真地校正调整后才能进行配作。调整、校正、配作虽然有利于保证装配精度，但却会影响生产率，不利于流水装配作业。

4．检验和实验

产品装配完毕，应根据有关技术标准和规定，对产品进行较全面的检验和实验工作，合格后才准许出厂。

5.1.3　装配精度

1．装配精度内涵

装配精度指产品装配后几何参数实际达到的精度，一般包含如下内容。

(1) 零件间的距离精度指相关零、部件间的距离精度及配合精度。距离精度是指零部件间的轴向间隙、轴向距离和轴线距离等。例如图5.4所示卧式车床前后顶尖对床身导轨的等高度。配合精度是指配合件之间应达到的规定的间隙和过盈量的要求，它直接影响到配合件的配合性质和配合质量。如轴和孔的配合间隙或配合过盈的范围。

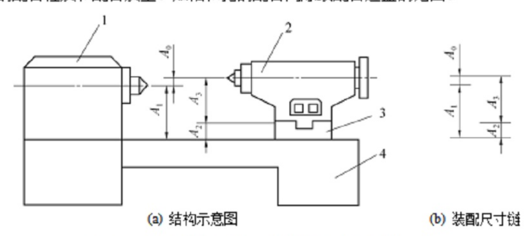


图5.4　车床主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高结构示意

1—主轴箱　2—尾座　3—尾座底板　4—床身

(2) 位置精度指相关零件的平行度、垂直度、同轴度等，如卧式铣床刀轴与工作台面的平行度，立式钻床主轴对工作台面的垂直度，车床主轴前后轴承的同轴度等。

(3) 相对运动精度指产品中有相对运动的零、部件间在运动方向及速度上的精度。如滚齿机滚入垂直进给运动和工作台旋转中心的平行度，车床拖板移动相对于主轴轴线的垂直度，车床进给箱的传动精度等。

(4) 接触精度指产品中两配合表面、接触表面或连接表面间实际的接触面积大小和接触点的分布情况与规定数值的符合程度。它既影响到零件间的接触刚度，又影响到零件的配合质量。如齿轮啮合、锥体配合以及导轨面之间均有接触精度的要求。

各装配精度之间存在着密切的关系，如位置精度是运动精度的基础，它对于保证尺寸精度、接触精度也会产生较大的影响。

2. 装配精度与零件精度的关系

机器和部件是由零件装配成的，零件的精度，特别是关键零件的加工精度对装配精度有很大影响。但当装配精度要求较高，影响装配精度的零件数量较多的情况下，装配精度若完全由有关零件的制造精度来保证，将导致加工成本增加或根本就难以制造。因此需要在装配过程中对有关零部件作必要的选择、调整、修配工作，从而来保证装配精度，如图 5.4 所示的卧式车床床头和尾座两顶尖的等高度要求。如果靠提高尺寸 A_1、A_2和 A_3的尺寸精度来保证是非常困难的，因为 A_1和 A_3实际上是由主轴、轴承、套筒和壳体构成的装配尺寸。生产中一般是将有关零件按经济精度制造，然后在装配中对底板进行修刮，改变 A_2尺寸，从而保证装配精度要求，并能进一步提高底板与床身导轨面间的接触精度。

由此可见，产品的装配精度与零件的加工精度有很密切的关系，零件精度是保证装配精度的基础；但是装配精度并不完全取决于零件精度，还与装配方法有关。机器的装配精度是由相关零件的加工精度和科学合理的装配方法来共同保证的。

3. 影响装配精度的因素

(1) 零件精度。机械产品及其部件均由零件组成。各相关零件的误差的累积将反映于装配精度。因此，产品的装配精度首先受到零件(特别是关键零件)的加工精度的影响。

(2) 零件精度及抗振性。零件间的配合与接触质量影响到整个产品的精度，尤其是刚度和抗振性，因此，提高零件间配合面的接触刚度亦有利于提高产品装配精度。

(3) 零件的变形量。零件在加工和装配中因热应力等所引起的变形对装配精度也会产生很大的影响。

(4) 装配方法。无疑，零件精度是影响产品装配精度的首要因素。而产品装配中装配方法的选用对装配精度也有很大的影响，尤其是在单件小批量生产及装配要求较高时，仅采用提高零件加工精度的方法往往不经济且不易满足装配要求，而通过合适的装配方法来保证装配精度非常重要。

综上所述，机械产品的装配精度主要依靠相关零件的加工精度和合理的装配方法共同保证。

5.2　保证装配精度的工艺方法

机械产品的精度要求，最终要靠装配工艺来保证。因此，用什么方法能够以最快的速度、最小的装配工作量和较低的成本来达到较高的装配精度要求，是装配工艺的核心问题。生产中保证产品精度的具体方法有许多种。经过归纳可分为互换法、选配法、修配法和调整法四大类。装配方法与解装配尺寸链的方法是密切相关的，为了达到规定的装配技术要求，解尺寸链确定部件中各个零件的公差时，必须保证它们装配后所形成的积累误差不大于按其工作性能要求所允许的数值。而且，同一项装配精度，因采用的装配方法不同其装配尺寸链的解算方法亦不相同(尺寸链解算可参见相关章节)。根据产品的性能要求、结构特点、生产形式和生产条件等可以采用不同的方法，现分述如下。

5.2.1　互换法

互换法即零件具有互换性。就是在装配过程中，各相关零件不经任何选择、调整，安装后就能达到装配精度要求的一种方法。产品采用互换装配法时，装配精度主要取决于零件的加工精度。其实质就是合理地控制零件的加工误差，使它们累积起来不超出装配精度的要求，来保证产品的装配精度。互换装配法的特点是装配质量稳定可靠，装配工作简单、生产率高，零部件有互换性，便于组织流水装配和自动化装配，是一种比较理想和先进的装配方法。因此，只要各零件的加工在技术上经济合理，就应该优先选用。尤其是在大批大量生产中广泛采用互换装配法。按互换程度的不同，互换装配法又分为完全互换法和不完全互换法两种。

1．完全互换法

在全部产品中，严格限制各个装配零件相关尺寸的制造公差，装配时各零件不需挑选、修配或调整就能保证装配精度的装配方法称为完全互换法(极值装配法)。

完全互换法的优点：可以保证完全互换性，装配质量稳定可靠(装配质量是靠零件的加工精度来保证的)，装配过程简单，不需要技术水平高的工人，机器的部件及其零件的生产便于专业化，容易解决备件的供应问题，降低成本，装配效率高(零件不需挑选，不需修磨)，装配工序工时容易控制，可以采用流水装配作业，易于实现自动装配，产品维修方便；完全互换法的不足之处：当装配精度要求越高时，对零件的制造精度要求越高，零件就难以按经济精度制造，加工成本增加。完全互换法的应用：完全互换装配法适用于在成批生产、大量生产中装配精度要求不高的机械结构。

因为有这些优点，因此只要能满足零件经济精度要求，无论何种生产类型都首先考虑采用完全互换法装配。但是在装配精度要求较高，尤其是组成零件数目较多时，就难以满足零件的经济精度要求。

2．不完全互换法

用完全互换法装配，装配过程虽然简单，但是由于它把制造公差限制的过小常使零件加工产生困难。以提高零件加工精度为代价来换取完全互换装配有时是不经济的，因此在大批大量生产条件下，就可考虑采用不完全互换法。此时零件公差就可放大些，但将有一

部分产品的装配精度可能超差。这就需要考虑好补救的措施，或者事先进行经济核算来论证可能产生废品而造成的损失小于因零件制造公差放大而得到的利益。如果利大于弊，那么不完全互换法就值得采用。

不完全互换装配法又称部分互换装配法或统计互换装配法。这种方法的实质是：为了降低制造成本，在相关零件较多、各零件生产批量较大时，根据概率论的原理可将各相关尺寸的公差适当放大，装配时在极少(一般情况下不会)出现返修调整的情况下仍能保证装配精度，这种方法称为部分互换法。

不完全互换法和完全互换法的特点相似，只是互换程度不同。不完全互换法采用概率法计算，因而扩大了公差。

3．应用互换法时确定公差的原则

互换法的实质就是用控制零件加工误差来保证装配精度的一种方法。换言之，就是零件加工公差按下面两种原则来规定。

(1) 各有关零件公差之和应小于或等于装配公差。这一原则可以用公式表示如下：

$$T_0 \geqslant \sum_{i=1}^{n} T_i = T_1 + T_2 + \cdots + T_n \tag{5-1}$$

式中　T_0——装配公差；

　　T_i——各有关零件的制造公差。

显然，以这种原则控制公差，零件是完全可以互换的，因此它适用于完全互换性。

(2) 各有关零件公差值平方之和的平方根小于或等于装配公差，即：

$$T_0 \geqslant \sqrt{\sum_{i=1}^{n} T_i^2} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + \cdots + T_n^2} \tag{5-2}$$

显然，与公式(5-1)相比，按公式(5-2)计算时，零件的公差可以放大些，使加工容易而经济，同时仍能保证装配精度。

按公式(5-1)制定零件公差，适用于任何生产类型。按公式(5-2)制定零件公差，只适用于大批量生产类型，其原理是根据概率理论。当符合一定条件时，也能达到“完全互换法”的效果，否则，将可能有一部分被装配的产品不符合装配精度要求，此时就成为“不完全互换法”。有关这方面的论述，详见装配尺寸链的概率计算法。

5.2.2　选择装配法

在成批或大量生产条件下，若组成零件不多而装配精度很高时，若采用完全互换法或不完全互换法，则对零件的公差要求很高，给机械加工带来困难，甚至超出加工工艺实现的可能性。如内燃机活塞与缸套的配合，滚动轴承内、外圈与滚珠的配合等。在这种情况下可以采用选择装配法。

选择装配法，是将配合副中各零件仍按经济精度制造(即制造公差放大了)，然后选择合适的零件进行装配，以保证达到规定的装配精度。

选择装配法有 3 种：直接选配法、分组选配法和复合选配法。

1．直接选配法

在装配时，工人从许多待装配的零件中，直接选择合适的零件进行装配，以保证装配

精度要求的选择装配法，称为直接选配法。例如，在柴油机活塞组件装配时，为了避免机器运转时活塞环在环槽内卡住，可以凭感觉直接挑选易于嵌入环槽中的合适尺寸的活塞环。

直接选配法的特点是：不需要预先将零件分组，但挑选配套零件的时间较长，装配精度较高，装配时凭经验和判断性测量来选择零件，装配时间不易准确控制(装配工时可能较长)，装配精度在很大程度上取决于工人的经验和技术水平，因此这种选配法不宜应用在生产节拍要求严格的大批大量流水线装配中。

2. 分组选配法

这种方法的实质是将加工好的零件进行测量，按实际尺寸的大小分成若干组，然后按对应组中的一套零件进行装配，以满足装配精度要求。同一组内的零件可以互换，分组数量越多，则装配精度就越高。零件的分组数要根据使用要求和零件的经济公差来确定。部件中各个零件的经济公差数值，可能是相同的，也可能是不相同的。

利用这种方法，可以不减小零件的制造公差而显著地提高装配精度，分组选配法应用在大批大量生产中，装配那些精度要求特别高同时又不便于采用调整装置的部件。例如，在柴油机的活塞销和活塞销孔、燃油设备的柱塞副、针阀副、齿轮油泵等的装配中，已广泛采用。

分组法装配的主要优点是：零件的加工公差不高，但却可获得很高的装配精度；同组内零件可以互换，具有互换法的优点，装配效率高。不足之处是：增加了零件存储量；增加了检验工时和费用；增加了零件分组、存贮、运输的工作量；在对应组内的零件才能互换，因而在某些组内可能剩下多余的零件不能进行装配等。

采用分组装配的具体注意事项如下。

(1) 配合件的公差应相等，公差的增加要同一方向，增大的倍数就是分组数，这样才能在分组后按对应组装配而得到预定的配合性质(间隙或过盈)及精度。

如图5.5所示，以轴孔间隙配合为例，设轴与孔的公差按完全互换法的要求分别为 $T_{轴}$、$T_{孔}$，并令 $T_{轴}= T_{孔}=T$。装配后得到最大间隙为 $S_{1\max}$，最小间隙为 $S_{1\min}$。

由于公差 T 太小，加工困难，故采用分组选配法。为此，将轴、孔公差在同一方向放大到经济可行的程度。设放大了 n 倍，即 $T'=nT$。零件加工完毕后，将轴与孔按尺寸分为 n 组，故每组公差仍为 $T=\dfrac{T'}{n}$。装配时按对应组装配。现以第 k 组为例，轴孔相配后得到的最大与最小间隙为：

$$S_{k\max}=[S_{1\max}+(k-1)T_{孔}-(k-1)T_{轴}]=S_{1\max} \tag{5-3}$$

$$S_{k\min}=[S_{1\min}+(k-1)T_{孔}-(k-1)T_{轴}]=S_{1\min} \tag{5-4}$$

可见无论哪一个对应组，装配后得到的配合精度与性质不变，都满足原设计要求。

如果轴与孔的公差不相等，就不能使各组获得相同的配合性质。

(2) 配合件的表面粗糙度、形位公差必须保持原设计要求，不能随着公差的放大而降低粗糙度要求和放大形位公差。

(3) 要采取措施，保证零件分组装配中都能配套，不产生某一组零件由于过多或过少，无法配套而造成积压和浪费。

按照一般正态分布规律，零件分组后，各组配合件的数量是基本相同的。以轴和孔配

套为例，其配套情况如图 5.6(a)所示。但如果由于某种工艺因素可能造成尺寸分布不是正态分布，如图 5.6(b)所示。因而在零件分组后，对应组的零件数量不等，造成某些零件过多或过少现象。这在实际生产中往往难以避免，需要采取措施予以解决。例如一种办法是采取分组公差不等的方法来平衡对应组的零件数量，如图 5.6(c)所示。但必须先分析由此而造成配合精度降低的情况是否允许。另一办法是在聚集相当数量的不配套零件后，专门加工一批零件来配套。

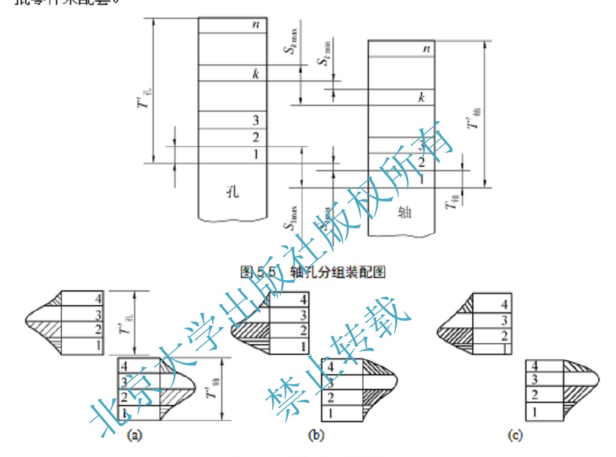


图 5.5　轴孔分组装配图

图 5.6　轴孔分组配套情况

(4) 分组数不宜过多，否则将使前述两项缺点更加突出而增加费用。

(5) 应严格组织对零件的精密测量、分组、识别、保管和运送等工作。

由上述可知，分组装配法的应用只适应于装配精度很高，组成件很少(一般只有两三个)的情况。分组装配法的典型，就是大量生产滚动轴承的工厂，为了不因前述缺点而造成过多的人力和费用的增加，一般都是采用自动化测量和分组等措施。

3. 复合选配法

复合选配法是上述两种方法的复合。先将零件预先测量分组，装配时再在各对应组中凭工人的经验直接选择装配。这种装配方法的优点是配合公差可以不相等，由于在分组的范围中直接选配，因此既能达到理想的装配质量，又能较快地选择合适的零件，装配质量高且速度快，能满足一定节拍的要求。例如：在汽车发动机汽缸和活塞的装配中，多采用这种方法。一般发动机的活塞均由制造厂大量生产，同一规格的活塞其裙部尺寸要按椭圆的长轴分组。

5.2.3　修配装配法

在单件小批生产中，装配精度要求较高而组成件较多时，若按互换法装配，会使零件精度太高而无法加工。例如图 5.4 所示的车床主轴顶尖与尾架顶尖的等高性，与此精度有关的组成件都较多，如果采用完全互换法，则有关零件的尺寸精度势必达到极高的要求；若采用不完全互换法，则公差值放大不多也无济于事，且小批生产也无条件采用不完全互换法；选配法当然也不适用。在这些情况下，修配法将是较好的方法而被广泛采用。

修配装配法是指在零件上预留修配量，在装配过程中用钳工或机械加工的方法修整去除零件上的多余部分材料，使装配精度满足技术要求。这样产品中其他有关零件就可以按照经济加工精度进行制造。

采用修配法时应注意：正确选择修配对象，首先选择那些只与本项装配精度有关而与其他装配精度无关的零件作为修配对象，然后再选择其中易于拆卸且修配面不大的零件作为修配件；应该通过计算，合理确定修配件的尺寸和公差，既要保证它具有足够的修配量，又不要导致修配量过大。因为修配一般是通过后续加工(如挫、刮、研等)修去零件表面上多余的材料从而满足装配精度要求的，若修配量不够，则可能会在没达到精度要求的时候已经无材料可去除；若修配量过大，又使劳动量过大，工时难以确定，降低劳动生产率。

修配法的主要优点是以经济精度加工零件，却可获得很高的装配精度。用修配法进行装配的不足之处是，装配工作复杂，劳动量大。产品装配以后，先要测量产品的装配精度，如果不合格，就要拆开产品，对某一零件进行修整，然后重新装配，再进行检验，直到满足规定的精度为止。

修配方法可归纳为以下三类。

1. 独件修配法

这种方法是在多环尺寸链中，选定某一固定的零件为修配件，在装配时进行修配以保证装配精度。该方法在生产中应用较广，如键的修配是为了保证与键槽的配合精度。

2. 合并加工修配法

将两个或多个零件预先合并在一起进行合并加工修配的一种修配方法。此法可以减少积累误差，并相应地减少修配工作量，提高劳动生产率。

例如将车床尾架与底板先进行部装，再将此部件最后进行精镗尾架上的顶尖套孔。这样就消除了底板的加工误差，而使尾架部件从底面到尾架顶尖套孔中心的高度尺寸误差减小，因此在总装时，就可减少对底面的修配量，达到车床主轴顶尖与尾架顶尖等高性这一装配精度要求。

合并加工修配法是零件配套后进入装配，给生产组织工作带来很多不方便，因此多用于单件小批量生产中。

3. 综合消除修配法

在机床制造中，常利用机床本身的切削加工能力以自己加工自己的方式来保证装配精度要求，这种方法称为综合消除修配法(也称自身加工修配法或就地加工修配法)。当某些

产品或部件装配精度要求很高时，由于严格控制各公差很难，且不易选择一个适当的修配件，此时便可采用就地加工修配法，这样可以直接抵消装配后产生的累积误差，保证装配精度。

如牛头刨床的工作台面总装时由自身刨出，保证了滑枕移动与工作台面的平行度要求。车床三爪卡盘装配后，在车床上直接加工卡爪面，以保证 3 个卡爪中心与机床主轴回转中心的同轴度要求。又如万能铣床的托架，装到横梁上后，其锥孔中心与主轴中心应同轴，若采用独件修配法十分困难，为保证此项精度，装配时将托架直接装到横梁上，由装在主轴上的镗刀直接加工托架锥孔，抵消了累积误差，简单有效地保证了同轴度要求。

5.2.4　调整装配法

装配时用改变调整件在机器结构中的相对位置或选用合适的调整件，来达到装配精度的装配方法称为调整装配法，简称调整法。

对于精度要求高且组成件又较多的产品和部件，在不能用互换法进行装配时，除了用分组互换和修配法外，便可用调节法来保证装配精度。

调节法的特点也是按经济加工精度确定零件的公差，但由于公差取得较大，就必然会使装配部件超差。为了保证装配精度，可改变一个零件的位置(可动调节法)，或选定一个(或几个)适当尺寸的调节件(用来调整的零件起到补偿装配累积误差的作用，故可称为补偿件)来补偿这种影响(固定调节法)。

调整装配法与修配装配法的原理基本相同，调整装配法与修配装配法的区别是调整法不是靠去除材料，而是靠改变补偿件的位置或更换补偿件的方法来保证装配精度。调整装配法的优点是可以随时调整由于磨损、热变形或弹性变形等原因所引起的误差，零件可以按经济精度要求确定加工误差。其不足之处是要另外增加一套调整装置，常常增大机构体积，装配精度依赖工人的技术水平，对于复杂的调整工作工时难以预计，不便于组织生产节拍严格的流水作业。

常见的调节调整件相对位置的方法有可动调整法、固定调整法和误差抵消调整法三种。

1．可动调整法

通过改变补偿件(移动或旋转来改变零件)的相对位置来达到装配精度要求的方法，称为可动调整法。调整过程中不需要拆卸零件，较为方便。在图 5.7(a)中，为调整滚动轴承间隙或过盈的结构，可保证轴承既有足够的刚度又不至于发热。图 5.7(b)中是通过转动调整螺钉 1 使斜楔块上下移动来保证螺母与丝杠螺纹副之间的合理间隙。

可动调整法的优点是：零件制造精度要求不高，但可以获得较高的装配精度；在机器使用过程中可以随时通过调整补偿件的相对位置来补偿由于磨损、热变形等因素引起的误差，使之恢复到原来的装配精度；它比修配法操作简单，容易实现。缺点是需要增加一套调整结构，增加了结构复杂程度，增加成本。可动调整法是广泛地应用于生产中的一种调整方法。

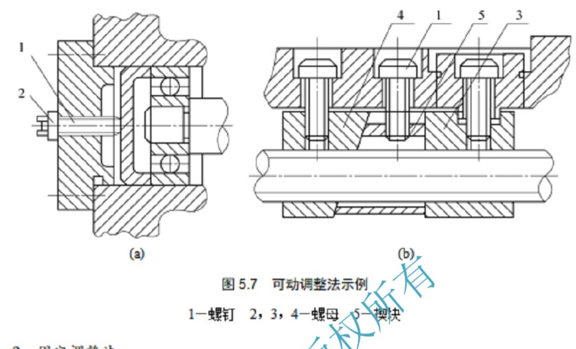


图 5.7　可动调整法示例

1—螺钉　2，3，4—螺母　5—楔块

2. 固定调整法

作为调整件的零件是按一定尺寸间隙级别制成的一组专用零件，根据装配时的需要，选用其中的某一级别的零件来作补偿，从而保证所需要的装配精度，这种方法称为固定调整法。通常使用的调节件有垫圈、垫片、轴套等。

固定调整法的特点是可降低对零件公差的加工要求，装配比较方便，且可以获得较高的装配精度，所以应用也比较广泛。但是固定调整法要预先制作许多不同尺寸规格的调整件，并将它们分组，这给装配工作带来一些麻烦，所以一般多用于大批大量生产或中批量生产中。

3. 误差抵消调整法

在机器装配中，通过调整被装配零件的相对位置，使其加工误差相互抵消一部分，或全部抵消，从而提高装配精度，这种装配方法称为误差抵消调整法，也可称定向装配法。该法是精密主轴部件装配中常用的一种基本方法，常常用在机床装配中，如在机床主轴装配时，通过调整前后轴承的径向跳动方向来控制主轴的径向跳动。但是由于误差抵消装配法需要事先测出补偿环的误差方向和大小，装配时需要技术等级高的工人，因而增加了装配前和装配时的工作量和工作难度，并给装配组织工作带来一定麻烦。误差抵消装配法多用于批量不大的中小批量生产或单件生产中。

如在车床精度标准中，规定了距主轴端面 300mm 处，主轴锥孔轴线对主轴回转轴线的径向跳动精度要求，该精度可用两者的同轴度误差 e_Δ 来表示。该装配精度与三项位置精度有关：主轴锥孔轴线($M—M$)与轴颈中心线($N—N$)的同轴度误差 e_s；前后轴承内环孔相对于外滚道的同轴度误差 e_2 和 e_1。这 3 种因素对 B 点径向跳动的影响及相互抵消的情况如图 5.8 所示。图中 O_1 和 O_2 分别为前后轴承外环的内滚道的圆心，O_1-O_2 即为主轴回转中心线。当存在 e_s、e_2、e_1 时，$N—N$ 和 $M—M$ 绕 O_1-O_2 旋转，即会产生 B 点处的径跳。此三因素的影响叙述如下。

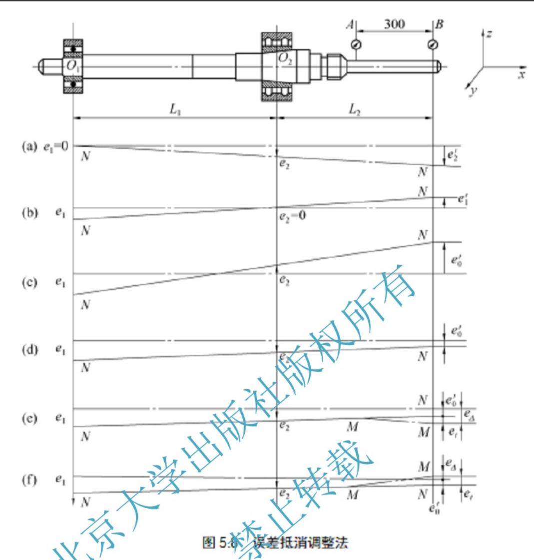


图 5.8 误差抵消调整法

图 5.8(a)表示只存在e_2时，即只有前轴承同轴度误差所引起的主轴同轴度误差情况。此时 B 点产生的径向跳动为：$e_2' = e_2(L_1 + L_2)/L_1$ 。

图 5.8(b)表示只存在e_1时，所引起的 B 点的径向跳动为：$e_1' = e_1 \cdot L_2 / L_1$ 。

由上两式可知，前轴承的精度对主轴径向跳动的影响较后轴承大，故前轴承精度一般要求高于后轴承精度。

图 5.8(c)表示 e_1 、e_2 同时存在且方向相反的情况，此时所引起的 B 点径向跳动为 $e_0' = e_1' + e_2'$ 。

图 5.8(d)表示 e_1 、e_2 同时存在但方向相同的情况，此时所引起的 B 点径向跳动为 $e_0' = e_1' - e_2'$ 。

从以上两式可以看出，e_1、e_2 同向时，B 点径向跳动较小。

图 5.8(e)表示e_1 、e_2同向再加上e_t 的情况，若e_t与e_0'反向，则$e_\Delta = e_0' - e_t$ 。

图 5.8(f)表示e_1 、e_2同向，e_t与e_0'同向的情况，则$e_\Delta = e_0' + e_t$ 。

以上两式可以看出e_t与e_0'反向时，B 点径向跳动较小。

实际生产中，可采用定向装配法，先将两轴承调整到图 5.8(d)所示位置，即使e_1 、e_2位于同一侧，然后再调整主轴径向位置，使 B 点径向跳动误差最小。

5.2.5 装配方法的选择

上述各种装配方法各有特点。一种产品究竟采用何种装配方法来保证装配精度，通常在设计阶段即应确定。选择装配方法的出发点是使产品制造过程达到最佳效果。具体考虑的因素有：装配精度、结构特点、生产类型及具体生产条件。其中有些方法对零件公差的加工要求不严，但装配时就要较严格；相反，有些方法对零件公差的加工要求较严，而在装配时就比较方便简单。但是，同一种产品的同一装配精度要求，在不同的生产类型和生产条件下，可能采用不同的装配方法。在装配方法确定后，通过尺寸链的解算，才能合理地确定各个零、部件在加工和装配中的技术要求。例如，在大量生产时采用完全互换法或调整法保证的装配精度，在小批生产时可用修配法。因此，工艺人员特别是主管产品的工艺人员，必须掌握各种装配方法的特点及其装配尺寸链的解算方法，以便在制订产品的装配工艺规程和确定装配工序的具体内容时，或在现场解决装配质量问题时，根据工艺条件审查并确定装配方法。

选用上述各装配方法时，各相关零件(包括修配件)究竟应以多大的公差来制造，采用分组装配法和固定调整装配法时应当如何分组等，必须应用装配尺寸链的方法来进行分析计算，有关这方面的内容详见尺寸链章节内容。

5.3 装配工艺规程

装配工艺规程是规定产品或部件装配工艺过程、顺序和操作方法等的工艺文件。制订装配工艺规程是生产技术准备工作中的一项重要工作。装配工艺规程是解决制订装配计划、指导装配工作和处理装配工作中所发生问题的重要依据。对于保证装配质量，提高装配生产效率，降低成本和减轻工人劳动强度等都有积极的作用。在设计或建造一个机械制造厂时，装配工艺规程是设计装配车间的基本文件之一。

5.3.1 制订装配工艺规程的原则

制订装配工艺规程的原则如下。

(1) 保证产品质量。产品的质量最终由装配保证。即使所有零件都合格，但如果装配不当，也可能导致产品不合格，因此，应选用合理和可靠的装配方法，全面、准确地达到设计要求的技术参数和技术条件，并要求提高精度储备量。

(2) 满足装配周期的要求。装配周期是根据产品的生产纲领计算的，完成装配工作所给定的时间，即所要求的生产率。大批量生产中，多用流水线来进行装配，对装配周期的要求由生产节拍来满足。单件小批量生产中，多用月产来表示装配周期。

特别提示

为提高生产率，应按产品结构、车间设备和场地条件，处理好进入装配作业的零件前后顺序，尽量减小钳工装配工作量，减轻体力劳动，提高装配机械化和自动化程度，注意自动装配工序的特殊要求等。

(3) 降低装配成本。应先考虑减小装配投资，如降低消耗，减小装配生产面积，减少工人数量和降低对工人技术水平的要求，减小装配流水线或自动线等的设备投资等。

(4) 保持先进性。在充分利用本企业现有装配条件的基础上尽可能采用先进装配工艺技术和先进装配经验。

(5) 注意严谨性。装配工艺规程应做到正确、完整、统一、清晰、协调、规范，所使用的术语、符号、代号、计量单位、文件格式与填写方法等要符合国家标准的规定。

(6) 考虑安全性和环保性。制定装配工艺规程时要充分考虑安全生产和防止环境污染。

5.3.2 制订装配工艺规程需要的原始资料

1. 产品图样和技术性能要求

产品图样包括总装图、部装图和零件图。总装配图上可以了解产品和部件的结构、装配关系、配合性质、相对位置精度等装配技术要求，从而制订装配顺序、装配方法；零件图则是作为在装配时对其补充加工或核算装配尺寸链的依据；技术条件则可作为制订产品检验内容方法及设计装配工具的依据；对产品、零件、材料、重量的了解可作为购置相应的起吊工具、运输设备的主要参数。

2. 产品的生产纲领

产品的生产纲领决定了产品的生产类型，而生产类型的不同，其装配工艺特征也不同，如组织形式、装配工艺方法、工艺过程、设备、操作量、技术水平、工艺文件等，表 5-1 在设计装配工艺规程时可做参考。

3. 现有生产条件

现有生产条件包括现有的装配工艺设备、装配工具、装配车间的生产面积、装配工人的技术水平等各种工艺资料。有了这些资料，所制订的装配工艺规程才能科学合理，切合实际。

4. 验收技术标准

指总装后验收产品的一种主要技术文件，是制订装配工艺规程的主要依据之一，它主要规定了产品主要技术性能的检验、实验工作的内容及方法。

5.3.3 装配的组织形式

目前，装配的组织形式主要有 3 种，即固定式装配、移动式装配和固定形式的分段装配。

1. 固定式装配

固定式装配是指全部工序都集中在一个工作地点(装配位置)进行。这时装配所需的零件和部件全部运送到该装配位置。

固定式装配又可分为按集中原则进行和分散原则进行两种方式。

1) 按集中原则进行的固定式装配

全部装配工作都由一组工人在一个工作地点上完成。由于装配过程有各种不同的工作，所以这种组织形式要求有技术水平较高的工人和较大的生产面积，装配周期一般也较长。因此，这种装配组织形式只适于单件小批量生产的大型柴油机、试制产品以及修理车间等的装配工作。

表5-1　各种生产类型的装配工艺特征

装配工作特点＼生产类型	大批量生产	成批生产	单件小批量生产
产品生产的特点	产品固定不变，生产内容长期重复，生产周期一般较短	产品在系列化范围内变动，分批交替投产或多品种同时投产，生产内容在一定时期内重复	产品经常变换，不定期重复生产，生产周期一般较长
组织形式	多采用流水装配线，有连续移动，间歇移动及可变节奏移动等方式，还可采用自动装配机或自动装配线	产品笨重且批量不大时多采用固定流水装配，批量较大时采用流水装配，多品种平行投产时用多种变节奏流水装配	多采用固定装配或固定式流水装配进行总装
装配工艺方法	优先采用完全互换法装配，精密偶件成对供应或分组供应装配，无任何修配工作	优先采用互换法，并灵活运用其他保证装配精度的方法，如调整法、修配法及合并加工法，以节约加工费用	以修配法及调整法为主，互换件比例较少
工艺过程	工艺过程划分很细，力求达到高度的均衡性	工艺过程的划分需适合于批量的大小，尽量使生产均衡	一般不制订详细的工艺文件，工序可适当调整，工艺也可灵活掌握
设备及工艺装备	专业化程度高，宜采用专用高效工艺装备，易于实现机械化自动化	通用设备较多，但也采用一定数量的专用工、夹、量具，以保证装配质量和提高功效	一般为通用设备及通用工、夹、量具
手工操作量和对工人技术水平的要求	手工操作比重小，熟练程度容易提高，便于培养新工人	手工操作比重较大，水平要求较高	手工操作比重大，要求工人有高的技术水平和多方面的工艺知识
工艺文件	有装配工艺过程卡和工序卡	有装配工艺卡，复杂产品要有装配工序卡	仅有装配工艺卡
应用实例	汽车、拖拉机、内燃机、滚动轴承、手表、缝纫机、电器开关等	机床、机车车辆、中小型锅炉、矿山采掘机械等	重型机床、重型机器、汽轮机、大型内燃机、大型锅炉等

2) 按分散原则进行的固定式装配

把装配过程分为部件装配和总装配，各个部件分别由几组工人同时进行装配，而总装配则由另一组工人完成。这种组织形式的特点是工作分散，允许有较多的工人同时进行装配，使用的专用工具较多，装配工人能得到合理分工，实现专业化，技术水平和熟练程度容易提高。所以，装配周期可缩短，并能提高车间的生产率。因此，在单件小批量生产条件下，也应尽可能地采用按分散原则进行的固定式装配。当生产批量大时，这种方式的装配过程可分成更细的装配工序，每个工序只需一组工人或一个工人来完成。这时工人只完

成一个工序的同样工作，并且工人可从一个装配台转移到另一个装配台。这种产品(或部件)固定在一个装配位置而工人流动的装配形式称为固定式流水装配，或称为固定装配台的装配流水线。

固定式流水装配生产时装配台安排在一条线上，装配台的数目由装配工序数目来决定，装配时所装配的产品不动，装配所需的零件不断地运送到各个装配台。

固定装配台的装配流水线，是固定式装配的高级形式。由于装配过程的各个工序都采用了必要的工夹具，工人又实现了专业化工作，因此，产品的装配时间和工人的劳动量有所减少，生产率得以显著提高。

这种装配方式在中、大功率柴油机的成批生产中已广泛使用。

2. 移动式装配

移动式装配是指所装配的产品(或部件)不断地从一个工作地点移到另一个工作地点，在每一个工作地点上重复地进行着某一固定的工序，在每一个工作地点都配备有专用的设备和工夹具，根据装配顺序，不断地将所需要的零件及部件运送到相应的工作地点。这种装配方式称为装配流水线。

根据产品移动方式不同，移动式装配又可分为以下两种形式。

1) 自由移动式装配

自由移动式装配的特点是，装配过程中产品是用手推动(通过小车或辊道)或用传送带和起重机来移动，产品每移动一个位置，即完成某一工序的装配工作。

在拟定自由移动式装配的工艺规程时，装配过程中的所有工序都按各个工作地点分开，并尽量使在各个工作地点所需的装配时间相等。

这种装配方式，在中型柴油机的成批生产中被广泛采用。

2) 强制移动式装配

强制移动式装配的特点是，装配过程中产品由传送带或小车强制移动，产品的装配直接在传送带或小车上进行。它是装配流水线的一种主要形式。强制移动式装配在生产中又有两种不同的形式：一种是连续运动的移动式装配，装配工作在产品移动过程中进行；另一种是周期运动的移动式装配，传送带按装配节拍的时间间隔定时地移动。

这种装配方式，在大量生产中被广泛采用。

3. 固定形式的分段装配法

这种装配方式的特点是，将机械产品分成若干个分段，各分段可同时进行分装配，然后再将装好的分段运送到总装台上进行总装配。

这种装配方式的优点是：分段装配可平行地进行，缩短了装配时间，可实现装配工作专业化，提高装配效率等。

5.3.4 制订装配工艺规程的步骤

1. 产品图样分析

从产品的总装图、部装图了解产品结构，明确零、部件间的装配关系；分析并审查产品结构的装配工艺性；分析并审核产品的装配精度要求和验收技术条件；研究装配方法；

掌握装配中的技术关键并制订相应的装配工艺措施；进行必要的装配尺寸链计算，确保产品装配精度。

2. 确定装配的组织形式

产品装配工艺规程的制订与其组织形式有关，如总装、部装的划分；装配工序的集中、分散程度；产品装配的运输方式；工作场地的组织等。根据产品的生产纲领，结构特点及现有生产条件确定生产组织形式。其选择可参考前文。

3. 划分装配单元

将产品划分成可进行独立装配的单元是制订装配工艺规程中最主要的一个步骤，这对于大批量装配结构复杂的机器尤为重要。划分装配单元是从工艺角度出发，将产品合理分解为可以进行独立装配的单元后，应便于装合或拆开以便合理安排装配顺序和划分装配工序，组织装配工作平行，流水作业。应选择各单元件的基件，并明确装配顺序和相互关系；尽可能减小进入总装的单独零件，缩短总装配周期。如本章5.1.1中装配单元的划分。

4. 选择装配基准

无论哪一级的装配单元，都需要选定某一零件或比它低一级的装配单元作装配基准件。选择时应遵循以下原则。

(1) 尽量选择产品基体或主干零件为装配基准件，以利于保证产品装配精度。

(2) 装配基准件应有较大的体积和重量，有足够支承面，以满足陆续装入零、部件时的作业要求和稳定性要求。

(3) 装配基准件的补充加工量应尽量小，并尽量不再有后续加工工序。

(4) 选择的装配基准件应有利于装配过程的检测，有利于工序间的传递运输和翻身转位等作业。

5. 确定装配顺序

将产品合理分解为可以进行独立装配的单元后，可确定各装配单元的装配顺序。首先选择装配的基准件(可以是一个零件或低一级的装配单元)进入装配，然后根据装配结构的具体情况，按先上后下、先内后外、先难后易、先精密后一般、先重大后轻小的一般规律，确定其他零件和装配单元的装配顺序。

确定装配顺序时应注意如下问题。

(1) 预处理工序在前，如零件的去毛刺与飞边、清洗、防锈、防腐、涂装和干燥等。

(2) 首先进行基础零、部件的装配：先利用较大空间进行难装零件的装配，先进行易损坏零件装配，以保证后续工序装配质量。如冲击性质装配、压力装配、加热装配等，补充加工工序应尽量安排在装配初期进行，以保证整个产品装配质量。

(3) 及时安排检验工序。

(4) 使用相同工装、设备和有公共特殊环境的工序，在不影响装配节拍的情况下，使工序尽量集中。以减少装配工装、设备重复使用，避免产品装配迂回。

(5) 处于基准件同一方位装配工序应尽可能集中连续安排，防止基准件多次转位和翻身。

(6) 电线、油(气)管路应与相应工序同时进行，以便零、部件反复拆卸。

(7) 含有易燃、易爆、易碎零部件的安装或有毒物质的安装，应该尽量放在最后，以减少前期安全防护工作，保证装配工作顺利进行。

装配顺序确定后，可绘制装配单元系统图。装配单元系统图有产品装配单元系统图和部件装配单元系统图两种，如图 5.9 所示。



(a) 产品装配单元系统图

(b) 部件装配单元系统图

图 5.9　装配单元系统示意

系统图中每一个零件、套件、组件、部件，都用长方格表示，长方格上方注明装配单元名称，左下方填写单元编号，右下方填写装配单元数量，装配单元的编号必须和装配图及零件图的明细表中的编号一致。

绘制装配单元系统图时，先画一条横线，在横线左端画出代表基准件的长方格，横线右端箭头指向装配单元的长方格，然后按装配顺序从左向右，一次将装入基准件的零件、套件、组件和部件引入。表示零件的长方格画在横线上方，表示套件、组件和部件的长方格画在横线的下方。

在装配单元系统图上加注所需的工艺说明，如焊接、配钻、攻丝、绞孔、检验等，则成为装配工艺系统图，如图 5.10 所示。

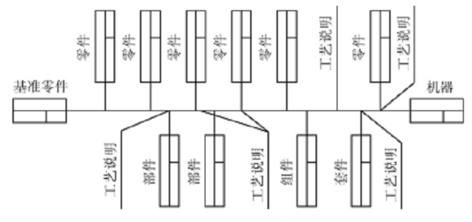


图 5.10　装配工艺系统示意

在装配工艺系统图中比较清楚、全面地反映了装配单元的划分，装配顺序和装配工艺方法，是装配工艺规程中的主要文件之一。

6. 划分装配工序

装配工序是指在某装配工位上对产品的某部位连续完成的装配工作。装配顺序确定后，就可以将装配工艺过程划分为若干工序进行具体的装配工序设计。装配工序的划分工作包括如下内容。

(1) 确定工序集中、分散的程度。

(2) 划分装配工序并确定其具体设备。

(3) 制订各工序操作规范，如过盈配合所需压力，变温装配的温度，紧固螺栓连接的拧紧扭矩及装配环境要求等。

(4) 选择设备及供应。

(5) 制订各工序装配质量要求及检测项目。

(6) 确定工时定额，并协调各工序内容。

7. 填写装配工艺文件

单件小批生产仅要求填写装配工艺过程卡片；中批生产时，一般也是只需要填写装配工艺过程卡片，对复杂产品则还需要填写装配工序卡；大批大量生产时，不仅要求填写装配工艺过程卡，而且还要求填写装配工序卡，以便指导工人进行装配。常用到的还有检验卡片和试车卡片等。简单的装配工艺过程有时可用装配工艺系统图代替。

8. 制定产品检测与实验范围

(1) 检测与实验的项目及检验质量指标。

(2) 检测与实验的方法、条件与环境要求。

(3) 检测与实验所需工艺装备的选择或设计。

(4) 质量问题的分析方法和处理措施。

5.4　装配自动化

5.4.1　概述

由于装配所占的总工时和总成本都很高，所以应尽量提高装配工作的自动化程度。由于目前加工的自动化程度已相当高，所以应将研究的重点放到装配自动化方面上来。装配自动化的实现不仅可以降低装配成本，改善工作的劳动条件，提高产品的质量稳定性，还可以提高装配工作效率。

1. 装配自动化的发展

原始的手工装配方式一直延续很久。直到19世纪机械制造业中零部件的标准化和互换性开始用于小型武器和钟表的生产，随后又应用于汽车工业。20世纪初，美国的福特汽车公司首先建立了采用运输带的移动式汽车装配线，将工序分细，在各工序上实行专业化装

配操作，使装配周期缩短了约 90%，降低了生产成本。从此改变了大批量生产中的装配方式。这对提高生产率带来了革命性的变化，起到了很大作用。互换性生产和移动式装配线的出现与发展，为大批量生产中采用自动化装配开辟了道路。但这种方式并没改变操作者的劳动强度，大量单调重复的工作仍然是手工劳动。此后，陆续出现了料斗式自动给料器和螺钉、螺母自动拧紧机等简单的自动化装置。大批量生产的轴承、离合器和中小型电机等零件、装配工艺简单的机电产品，以及汽车、农业机械、仪器仪表等产品中的部分简单部件，也采用了自动或半自动装配机(线)。可是由于对适合自动化装配的产品结构有很大限制，自动化装配机投资多而对产品改型的适应性小，所以当时机械制造中的装配自动化仅用于大批量生产。

对于汽车、家电等大批量生产的产品，常采用自动装配线的作业方式，这种系统的“刚性”太大，一旦产品更换，则系统要做很大的改变。随着消费方式的改变，多品种、小批量生产方式正在逐步占统治地位，因此需要大力发展适应中、小批量生产装配自动化的柔性装配系统。20 世纪 60 年代，随着数字控制技术的迅速发展，出现了自动化程度较高而又有较大适应性的数字控制装配机，从而有可能在多品种、批量生产中采用自动化装配。1982 年，日本的个别工厂中已采用数字控制工业机器人来自动装配多种规格的直流伺服电机。

自动化装配的最新发展趋势，就是采用单独编程的或用计算机控制的机械手或工业机器人进行装配。大部分工业机器人都是简单地从某一存放位置把零件拿起，并移到一个新的位置。某些机器人也可使其与另一个零件靠在一起，或者将销、杆、轴等装入孔内，还能通过拧螺丝、滑入、嵌套和锁紧等方法把几个零件装配在一起。

根据机器人的用途，通过用多自由度机械手加上适当的夹具作为组件，使用机器人进行自动装配的柔性大幅度提高，适用于多品种的装配工作。目前一些发达国家正在着力研究和开发机器人的硬件和软件技术，以提高装配的速度、精度及可靠性等。

装配工作的最终目标是实现用机械化手段代替手工操作的机械化装配或自动化装配，保证产品质量及其稳定性，改善劳动条件，提高劳动生产率，降低生产成本。所有的操作全部由机器代替，就叫做全自动化装配。实现装配自动化的前提条件是产品的装配工艺性应符合自动装配的要求。

2. 装配自动化的基本条件

生产纲领较大而且稳定；零部件标准化、通用化程度较高，如装配工作有良好的可分性，零件容易定向、定位；产品具有较好的自动装配工艺性，零件间联接多用胶接和焊接代替螺纹联接，避免使用垫片等调整件；装配中重复动作多，劳动强度大或影响操作者健康的作业；采用自动化装配后应具有较好的经济效果，可降低生产成本。符合上述条件，才可考虑装配自动化。

为使产品适合于自动装配系统的作业，在设计时应遵循下面的原则：零部件的结构简单，形状规则；零件的尺寸能够互换；零件的形状应是对称的；零件的组装方向尽可能一致；减少零件的数量以及在零件上增加易于定位的结构。例如，在轴孔的插入端设计大倒角，便于轴孔的插入装配。如表 5-2 所示为几种改善自动装配工艺性的例子。

表 5-2　几种改善自动装配工艺性的例子

改善内容	改善前	改善后
简化自动定向及装配，使零件定向		
增加定向辅助面，便于定向		
改变外形或尺寸差异，防止运送时卡住		
减少装配的零件，简化自动化装配工序		
统一装配方向，减少工件的翻转		
以铆、焊、粘合代替螺纹连接，简化自动装配		

3. 装配自动化的类型

装配自动化一般可分为下面 3 种类型：专用性的高度自动化装配、通用性强的柔性自动化装配及人机结合的半自动化装配。

专用性的高度自动化装配一般采用装配自动线的形式，特别适用于大批大量生产的情况；通用性强的柔性自动化装配一般采用计算机控制的装配机器人来实现，当装配情况发生变化时，通过改变控制程序来适应，适用于中、小批量生产的情况，也是最值得研究的一种装配系统；人机结合的半自动化装配，由人完成比较复杂的、机器难于实现的工作，机器完成比较简单的、易于自动化的部分。在一定条件下，这种人机结合的半自动化系统具有最大的优势，但应找到人机结合的最佳点。

5.4.2　装配自动化的基本内容

机械装配自动化主要包括传送自动化，零件定位和定向自动化，清洗、平衡、分选、装入、联接和检测自动化，自动控制等几个方面。

1. 传送自动化

传送自动化技术目前比较成熟，可以采用自动化加工中的各种技术。按照基础件在装

配工位间的传送方式不同，装配机(线)的结构可分为回转式(如图 5.11 所示)和直进式(如图 5.12 所示)两大类。

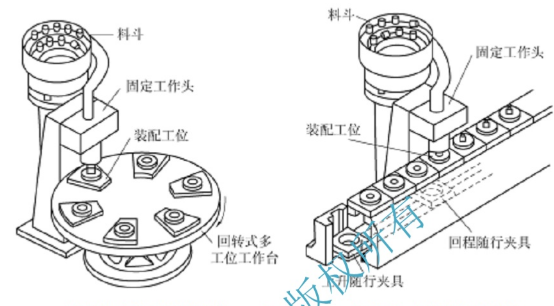


图 5.11　回转式装配机(线)　　　图 5.12　直进式装配机(线)

(1) 回转式结构较简单，定位精度易于保证，装配工位少，适用于装配零件数量少的中小型部件和产品的装配。基础件可连续传送或间歇传送，间歇传送时，在基础件停止传送时进行装配作业。生产中间歇传送应用较广泛。

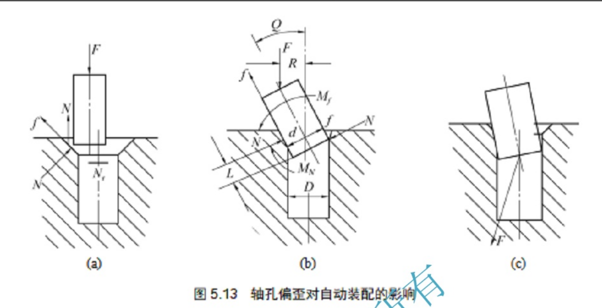
(2) 直进式装配机的结构比回转式装配机复杂，装配工位数不受限制，调整较灵活，但占地面积大，基础件一般间歇传送。按照间歇传送的节拍又分为同步式和异步式：同步式适用于生产批量大、装配零件少、节拍短的场合；异步式适用于自由节拍、装配工序复杂、手工装配与自动装配相结合的装配线上。传送装置主要有回转工作台、链式传送装置和异步的夹具式链传送装置等，各种传送装置可供基础件直接定位或用随行夹具定位。

2. 零件定位和定向自动化

零件的定位和定向自动化实现的难度比较大，除在设计中采用易于定位定向的结构(插入倒角、定向平面、槽等)外，在装配系统中还应设置相应的柔性机构，以补偿被装配零件错位带来的“干涉”现象。有时，系统还应配备视觉传感器、触觉传感器和力传感器，用来实现零件之间的正确定位。

在机器能够实现的装配作业中，最常见的有两类：轴孔装配和螺钉螺孔装配。

轴孔类零件装配的主要矛盾是装配时轴孔的对中性要好，既不能有较大的偏移量，又不能有较大的偏倾角。当偏倾角大时，会产生“卡住”现象，影响装配的顺利实现。这种现象已有很多学者进行过研究。图 5.13 表示轴孔偏歪对自动装配的影响。



(a)　(b)　(c)

图 5.13　轴孔偏歪对自动装配的影响

图 5.13(a)表示装配时零件有较大的中心偏移量，为了保证轴能顺利地插入孔中，采用了大倒角结构。图 5.13(b)表示由于中心偏移量而带来轴相对于孔的偏斜(装配机械手具有柔性机构来补偿这种偏斜)以及各个力的分布情况。图 5.13(c)表示“卡住”时的情况。很容易得出能顺利装配的条件为：

$$\frac{L}{2R} > \mu \tag{5-5}$$

式中　μ——摩擦系数；

L 和 R——如图 5.13(b)所示。

可见，为保证顺利装配，可以减小摩擦系数，但除了使用润滑剂外，轴孔的表面粗糙度由功能所决定，减小表面粗糙度会带来制造成本的大幅度提高；也可以采用更大的倒角，但会减少配合面，结构上往往不允许；最好的办法是减少轴孔的偏移量，有如下几种办法。

(1) 提高装配机械系统的精度，特别是定位精度。

(2) 采用视觉和触觉检测反馈校正系统，这种系统在工作时，首先使两个工件接近或接触，通过视觉检测或触觉检测，求出位置偏差量，然后进行反馈校正，使轴孔处于可以顺利装配的位置。这种方法又叫做主动逼近法。

(3) 采用柔性机构，即在系统中增加弹性环节，当轴产生偏斜时，系统产生弹性变形，使轴孔中心处于平行状态。这种方法又叫做被动逼近法。

(4) 采用导向装置，即采用导向装置保持轴孔相对位置，常用于大批量生产。在装配作业中，螺纹连接件的装配占的比例很大，而且劳动强度也大。因此，实现螺纹连接件装配的自动化具有重要的意义。螺纹连接件装配的特点是，螺钉、螺母和垫圈均属小件，易于实现上料自动化(如振动式送料和料仓上料装置)。与轴孔装配相同的是，螺纹连接中的装配也存在着零件间的自动找正问题。所以，前面轴孔装配中有关自动找正的各种方法都适用于螺纹连接件的装配。另外，螺纹连接件的装配还需要一个拧紧螺钉的回转运动，这种回转运动可用专门的装置来完成。常见的自动拧紧装置有电动拧紧装置、气动拧紧装置和液动拧紧装置。这三种自动拧紧装置各有优缺点，共同的特点是转速不能太高，并应具有扭矩控制功能。典型的自动拧紧螺钉装置及动作过程如图 5.14 所示，这是个供料和拧紧

一体化的结构，动作循环为：送料→改锥进给→改锥旋转拧紧→改锥退出→送料。

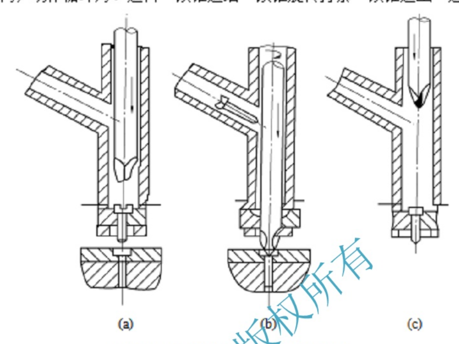


图 5.14　自动拧紧螺钉装置及动作过程

3．清洗、平衡、分选、装入、联接和检测自动化

自动装配作业包括自动清洗、平衡、分选、装入、联接和检测等，有时还包括成品包装和一些辅助的加工工序。

(1) 清洗自动化是将零件自动输送到清洗机构，按规定程序自动完成清洗作业，然后输送到下一工序。

(2) 平衡自动化的特点是在测出不平衡量的大小与相位后，用自动去重或配重的方法求得平衡。常用的去重方法是通过钻削或铣削将不平衡量去除；对于小型的精密零件(如陀螺仪转子等)不平衡量很小，可用激光气化方法去除。自动配重是根据不平衡量的大小自动选取相应重量级别的平衡块，用焊接或胶接方法固定在被平衡零件的相应位置上。

(3) 分选自动化是通过自动测量测出零件的配合尺寸，并按规定的几组公差带将零件自动分组，使各对应组内相互配合的零件实现互换装配。自动分选是采用选配法装配之前的必要工序，在自动分选机上进行。

(4) 装入是自动装配作业中最基本的工序，有重力装入、机械推入和机动夹入三种方式，可根据具体情况选择。采用较多的是机械推入和机动夹入，先将零件夹持，保持正确定向，在基础件上对准，再由装入工作头缓慢进给，将其装入基础件的内部。

(5) 螺纹联接的自动化操作常采用螺钉或螺母的自动装配工作头，一般包括抓取、对准、拧入和拧紧等动作，通常需要有扭矩控制装置，以保证达到要求的紧固程度。

(6) 检测自动化是装配自动化的重要组成部分。常见的检测项目有：装配过程中的检测，如检查是否缺件，零件方向和位置是否正确及夹持是否可靠等；装配后的部件或产品的性能检测，如轴的振动、回转运动精度、传动装置的间隙、起动和回转扭矩、振动、噪声以及温升等。将实测结果与检测的标准相对比，以决定合格与否。装配过程中出现不合格情况时，便自动停止装配，并发出信号。有关产品性能的实测数据常由自动打印机输出备查。

4．控制自动化

自动装配中各种传送、给料和装配作业的程序以及其相互协调必须依靠控制系统。常用的是由凸轮、杠杆、弹簧和挡块等机构组成的固定程序的控制系统，但当装配的部件或产品的结构有较大的改变时便不能适应。如采用数字控制系统，在装配件改变时容易调整工序。特别是微处理机或电子计算器，具有记忆和逻辑运算功能，可存贮各种工作程序，供随时调用，这种控制系统适用于中小批量的多品种自动装配。

5.4.3　装配机器人及柔性装配系统

制造系统主要发展方向是多品种、小批量的自动化生产。因此，面向多品种、小批量的装配自动化系统就成为制造自动化的主要研究方向。面向中、小批量生产的装配自动化系统应能够适应产品的频繁更换(由于批量小，不适合采用流水作业的装配工艺)。因此，这种系统应具有足够大的柔性，常称为柔性装配系统。其主要特点是装备有由计算机控制的，可以方便修改装配动作的装配机器人。

装配机器人事实上是用计算机控制的机械手臂，手臂可以灵活地在空间做各种运动。装配机器人除要求手臂动作灵活，并具有一定活动空间外，还要求机械手具有一定的负荷重量的能力。另外，还要求机械手具有较高的定位精度。为了提高定位精度，有的装配机器人还配置有检测装置，具有反馈控制功能。图 5.15 所示为一装配机器人工作情况，这个装配机器人有两个机械手，可以完成轴孔类零件的装配工作，为了保证轴孔装配的顺利进行，主机械手配有触觉传感器。

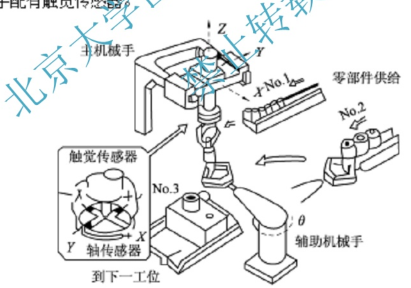


图 5.15　装配机器人工作情况

柔性自动装配系统一般是由装配机器人构成的自动化系统。除装配机器人外，它还包括总控部分、工具库、夹具及辅具、自动供料系统和成品输送系统等。表 5-3 所示为一柔性装配系统的组成。

由于采用了装配机器人，可以通过改变控制程序方便地变更机械手的动作，因此系统具有很强的适应性，可以满足多品种、小批量自动装配的要求。

柔性自动装配系统的发展方向是研制“智能型”装配系统，这种系统具有自学功能，

可以用示教的方式方便地更改机械手的动作顺序和动作范围。这种系统具有视觉和触觉功能，根据视觉和触觉功能，再加上判断和决策能力，机械手的动作可以跟视觉系统协调起来，由视觉指挥动作。

表 5-3　柔性装配系统的组成

系统	子系统	组成
柔性自动装配系统	可编程的控制系统	控制计算机
		人机对话示教器
	圆柱坐标式四自由度机器人系统	可自动更换手指的手部
		带弹性的随动式手腕
		伸缩式手臂
		升降式可回转的机身
	可换的手部及工具库系统	自动回转台
		小三爪抓取器
		大三爪抓取器
		自动拧螺丝刀(改锥)
		自动拧螺丝套筒
		转子螺母拧紧器
		压力夹头
	夹具及辅具系统	主要装配夹具
		辅助装配夹具
	自动供料系统	风扇自动输料器
		后壳体自动输料器
		转子自动输料器
		垫片垫圈螺帽自动送料器
		皮带轮自动输料器
		轴承自动输料槽
		螺钉自动输料槽
		前壳体自动输料器
	成品输送存储系统	成品自动输料库
		成品自动存储库

本 章 小 结

本章对机械装配工艺基础的基本概念、工作内容、保证装配工艺基础的方法和工艺规程的制订作了系统的阐述，并介绍了装配自动化的基本知识。

装配是指按规定的技术要求，将零件、套件、组件和部件进行配合和连接，使之成为半成品或成品的工艺过程。

装配精度指产品装配后几何参数实际达到的精度。

保证装配精度的具体方法有：互换法、选配法、修配法和调整法四大类。

装配的组织形式：固定式装配、移动式装配。

装配工艺规程是指规定产品或部件装配工艺过程、顺序和操作方法等的工艺文件。

制订装配工艺规程的原则：保证产品质量、满足装配周期要求、降低装配成本、保持先进性、注意严谨性。

制订装配工艺规程的内容和步骤：产品图样分析、确定装配的组织形式、划分装配单元、选择装配基准、划分装配单元、划分装配工序、填写装配工艺文件。

机械装配自动化主要包括传送自动化，零件定位和定向自动化，清洗、平衡、分选、装入、联接和检测自动化，自动控制等几个方面。

习　题

(1) 什么是机械装配？

(2) 机械装配的基本内容包括什么？

(3) 影响装配精度的因素有哪些?

(4) 机械产品的装配精度与零件的加工精度、装配工艺方法有什么关系？

(5) 保证产品装配精度的工艺方法有哪些？

(6) 各种保证装配精度的工艺方法特点是什么？

(7) 装配工艺规程的概念是什么？装配工艺规程的原则是什么？

(8) 制订装配工艺规程的原始资料有哪些？

(9) 简答制订装配工艺规程的步骤。

(10) 机械装配自动化包括哪些内容？

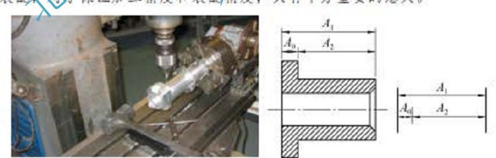
第6章 尺 寸 链

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握尺寸链的基本含义	尺寸链的基本概念、组成、分类、主要特征，封闭环、组成环、增环、减环的概念和判断方法	20%	
掌握尺寸链的计算方法	极值解法，概率解法	30%	
掌握工艺尺寸链的计算	各种工艺尺寸链的分析和计算	30%	
掌握装配尺寸链的计算	装配尺寸链的分析和计算	20%	

引例

在加工机器零件过程中，我们可以发现，当改变零件的某一尺寸大小，会引起其他有关尺寸的变化。同样，在装配机器时也可发现，零件与零件之间在部件中的有关尺寸，同样是密切联系、相互依赖的。这种尺寸之间的相互联系或相互依赖性，简称为“尺寸联系”。如图所示零件，随着加工过程的进行，A_1、A_2和A_0三个尺寸就形成了一个封闭的尺寸组合，且A_1、A_2的变化会影响A_0的尺寸大小。因此，研究和制订合理的工艺规程，采用有效的加工方法和装配，对于保证加工精度和装配精度，具有十分重要的意义。



套筒的加工及尺寸链图

6.1 基 本 概 念

为了保证机器或仪器能顺利的进行装配，并达到预定的工作要求。要在设计与生产过程中，正确分析和确定各零部件尺寸关系，合理确定构成各有关零部件的几何精度(尺寸精度、形状和位置精度)，它们之间的关系需用尺寸链来计算和处理。尺寸链的原理和计算方法并不复杂，但尺寸链基本概念却十分重要，具体计算又比较繁琐，因此在学习过程中必须多加分析和比较，以便熟练地掌握这个方法。

6.1.1　尺寸链定义

在加工机器零件过程中可以发现，当改变零件的某一尺寸大小，会引起其他有关尺寸的变化。同样，在装配机器时也可发现，零件与零件之间在部件中的有关尺寸，同样是密切联系、相互依赖的。这种尺寸之间的相互联系或相互依赖性，简称为“尺寸联系”。如图 6.1 所示，尺寸 A_2 已加工好，现以底面 B 定位，用调整法加工 C 面，直接得到尺寸 A_1，并间接保证尺寸 A_0，此时，A_1、A_2 和 A_0 这 3 个尺寸就形成一个封闭尺寸组合。如图 6.2 所示，装配时孔的尺寸 A_1 和轴的尺寸 A_2 已经确定，装配后间接形成装配间隙 A_0，必须通过控制轴和孔的尺寸来间接保证装配精度，这就需要分析 A_1、A_2 和 A_0 之间的内在关系，则 A_1、A_2 和 A_0 即构成一个封闭的尺寸组合。

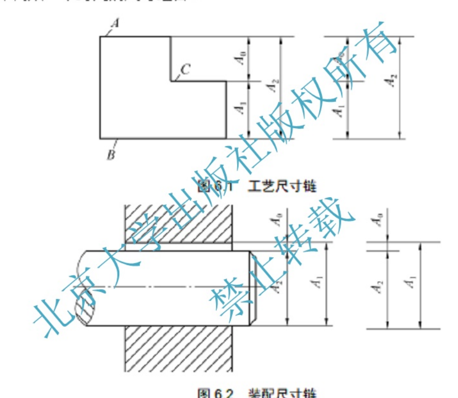


图 6.1　工艺尺寸链

图 6.2　装配尺寸链

这种由互相联系的按一定顺序首尾相接构成封闭形式的一组尺寸就定义为尺寸链。

6.1.2　尺寸链组成

1. 环

构成尺寸链的每一个尺寸都称为“环”。

2. 封闭环

封闭环是尺寸链中在加工或装配过程中最后形成的一环，它的大小是由组成环间接保证的。如图 6.1 和图 6.2 中的 A_0。在一个尺寸链中只有一个封闭环。

3. 组成环

组成环是尺寸链中对封闭环有影响的其他各环。组成环又可分为增环与减环。

(1) 增环：若该组成环变动引起封闭环的同向变动(同向变动是指该环增大时封闭环也增大，该环减小时封闭环也减小)，则该环为增环。用 $\overrightarrow{A_i}$ 表示，如图 6.2 中的 A_1。

(2) 减环：若该组成环的变动引起封闭环的反向变动(反向变动是指该环增大时封闭环减小，该环减小时封闭环增大)，则该环为减环，用 $\overleftarrow{A_i}$ 表示，如图 6.2 中的 A_2。

4. 增环减环的判别

用增环减环的定义可判别组成环的增减性质，但是环数多的尺寸链就不易判别了，现介绍两种方法来判别增减环的性质。

1) 回路法

在尺寸链简图上，先给封闭环任意定一个方向并画出箭头，然后沿此方向环绕尺寸链回路，依次给每一组成环画上箭头，凡箭头方向与封闭环相反的为增环；与封闭环方向相同的则为减环。如图 6.2 所示，A_1 为增环，A_2 为减环。

2) 直观法

直观法只要记住两句话就可判别：①与封闭环串联的尺寸是减环；与封闭环共基线并联的尺寸是增环。②串联的组成环性质相同，共基线并联的组成环性质相反。

这种方法判别组成环性质十分方便，且便于记忆，对环数多的尺寸链特别方便。

6.1.3　尺寸链特征

1. 封闭性

尺寸链必须是一组有关尺寸首尾相接构成封闭形式的尺寸，其中应包含一个间接保证的尺寸和若干个对此有影响的直接获得的尺寸。

2. 关联性

尺寸链中的任何一个尺寸变化都将直接影响其他尺寸的变化。例如在图 6.1 中，封闭形式的各尺寸 A_1、A_2 和 A_0 构成了尺寸链，其中尺寸 A_1、A_2 中任何一个尺寸的变化，都将会影响尺寸 A_0 的精度。同样，在图 6.2 中，A_1、A_2 的变化直接影响装配间隙的大小。尺寸链中间接保证的尺寸的大小和变化，是受这些直接获得的尺寸的精度所支配的，彼此间具有特定的函数关系，并且间接保证的尺寸精度必然低于直接获得的尺寸精度。

6.1.4　尺寸链分类

1. 按照尺寸链的功能要求分类

1) 工艺尺寸链

指在加工过程中的各有关工艺尺寸所组成的尺寸链，如图 6.1 所示。

2) 装配尺寸链

指各有关装配尺寸所组成的尺寸链，如图 6.2 所示。

2．按尺寸链间相互联系分类

1) 独立尺寸链

指链内所有的环都只从属于该尺寸链，其中任何一环都不与任何其他尺寸链发生关系。图 6.1、图 6.2 所示尺寸链均为独立尺寸链。

2) 并联尺寸链

有一个或几个环，以公共环的形式存在于两个或更多个尺寸链中，就形成并联尺寸链，如图 6.3 所示。其中 A_1、B_1 为公共环。它必须同时满足所并联的 A 尺寸链与 B 尺寸链的要求。为此，应将此并联尺寸链分解为单一的 A 尺寸链与 B 尺寸链，按尺寸链原理分别建立两个方程，然后联列求解。

图 6.3　并联尺寸链

3．按环的几何特征分类

1) 长度尺寸链

指全部环为长度尺寸的尺寸链，如图 6.1、图 6.2 所示。

2) 角度尺寸链

指全部环为角度尺寸的尺寸链，如图 6.4 所示。

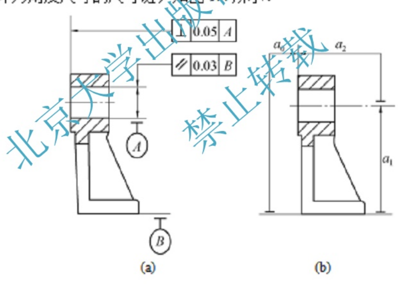


图 6.4　角度尺寸链

4．按环的空间位置分类

1) 直线尺寸链

指全部组成环平行于封闭环的尺寸链，如图 6.1、图 6.2 所示。

2) 平面尺寸链

指全部组成环位于一个(或几个平行)平面内，但某些组成环不平行于封闭环的尺寸链，如图 6.5 所示。

3) 空间尺寸链

指组成环位于几个不平行平面内的尺寸链。

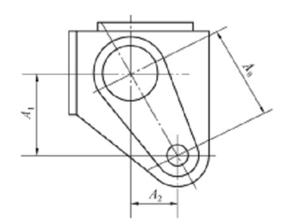


图 6.5　平面尺寸链

6.1.5　尺寸链的作法

下面举例说明尺寸链图的具体作法。

如图 6.6 所示的套筒零件，设计时根据装配图要求，标注了如图 6.6 (a)所示的轴向尺寸 $10_{-0.36}^{\ 0}$ mm 和 $50_{-0.17}^{\ 0}$ mm，至于大孔深度则没有明确的精度要求，只要上述两个尺寸加工合格，它也就符合要求。因此零件图上的这个未标注的深度尺寸，就是零件设计时的封闭环 A_0。连接有关的标注尺寸作出尺寸链图，如图 6.6(b)所示，则 $\vec{A}_1 = 50_{-0.17}^{\ 0}$ mm 是增环，$\overleftarrow{A}_2 = 10_{-0.36}^{\ 0}$ mm 是减环。

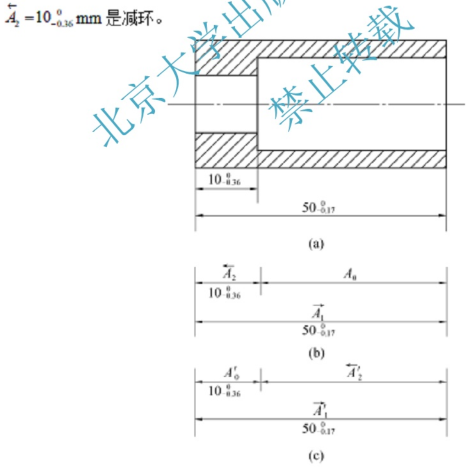


图 6.6　套筒零件的两种尺寸链

可是，在具体加工时往往先加工外圆、车端面，保证全长 $50_{-0.17}^{0}$ mm，再钻孔、镗孔。由于测量 $10_{-0.36}^{0}$ mm 比较困难，所以总是用深度游标卡尺直接测量大孔深度。这时，$10_{-0.36}^{0}$ mm 成为间接保证的尺寸，故成了工艺尺寸链的封闭环 A_0'(如图 6.6 (c)所示)，其中 $\vec{A}_1 = 50_{-0.17}^{0}$ mm 仍然是增环，但 $\overleftarrow{A}_2'$ (大孔深度)成为减环。制定工艺规程时，为了间接保证 $\overleftarrow{A}_2 = 10_{-0.36}^{0}$ mm，就得进行尺寸链计算，以确定作为组成环的大孔深度 $\overleftarrow{A}_2'$ 的制造公差。这也是测量基准与设计基准不重合的尺寸换算。

由上面这个具体例子可以看出，尺寸链图的作法可归结如下。

(1) 首先根据工艺过程或加工方法，找出间接保证的尺寸，并把它定为封闭环。

(2) 从封闭环起，按照零件上表面间的联系，依次画出有关的直接获得的尺寸(大致上按比例)，作为组成环，直到尺寸的终端回到封闭环的起始端形成一个封闭图形。必须注意：要使组成环环数达到最少。

(3) 按照各尺寸首尾相接的原则，可顺着一个方向在各尺寸线终端画箭头。凡是箭头方向与封闭环箭头方向相同的尺寸就是减环，箭头方向与封闭环箭头方向相反的尺寸就是增环。

特别提示

(1) 工艺尺寸链的构成，取决于工艺方案和具体的加工方法。

(2) 确定哪一个尺寸是封闭环，是解算尺寸链的决定性的一步。封闭环错了，整个解算就错了，甚至得出完全不合理的结果(例如：一个尺寸的上偏差小于其下偏差)。

(3) 一个尺寸链只能解算一个封闭环。

(4) 在一个尺寸链中，增环和封闭环必不可少。而减环，有的尺寸链有，有的尺寸链没有。

6.2　尺寸链的计算

在尺寸链的计算过程中，通常会出现以下几种情况。

(1) 正计算：已知各组成环的极限尺寸，求封闭环的极限尺寸。这类计算主要用来验算设计的正确性，故又叫校核计算。

(2) 反计算：已知封闭环的极限尺寸和各组成环的基本尺寸，求各组成环的极限偏差。这类计算主要用在设计上，即根据机器的使用要求来分配各零件的公差。

(3) 中间计算：已知封闭环和部分组成环的极限尺寸，求某一组成环的极限尺寸。这类计算常用在工艺设计上。

计算尺寸链可以用极值法或概率法。目前生产中一般采用极值法，概率法主要用于生产批量大的自动化及半自动化生产方面；但是当尺寸链的环数较多时，即使生产批量不大也宜用概率法。

6.2.1　极值法

用极值法计算尺寸链封闭环的基本计算式包括以下几个。

1．封闭环的基本尺寸

根据尺寸链的封闭性，封闭环的基本尺寸等于组成环基本尺寸的代数和，即：

$$A_0=\sum_{i=1}^{m}\overrightarrow{A_i}-\sum_{i=m+1}^{n-1}\overleftarrow{A_i} \tag{6-1}$$

式中　A_0——封闭环的基本尺寸；

$\overrightarrow{A_i}$——增环的基本尺寸；

$\overleftarrow{A_i}$——减环的基本尺寸；

m——增环的环数；

n——包括封闭环在内的总环数。

2．封闭环的极限尺寸

若组成环中的增环都是最大极限尺寸，减环都是最小极限尺寸，则封闭环的尺寸必然是最大极限尺寸(故极值法又称极大极小值法)，即：

$$A_{0\max}=\sum_{i=1}^{m}\overrightarrow{A}_{i\max}-\sum_{i=m+1}^{n-1}\overleftarrow{A}_{i\min} \tag{6-2a}$$

同理：

$$A_{0\min}=\sum_{i=1}^{m}\overrightarrow{A}_{i\min}-\sum_{i=m+1}^{n-1}\overleftarrow{A}_{i\max} \tag{6-2b}$$

3．封闭环的上偏差 $\mathrm{ES}(A_0)$ 和下偏差 $\mathrm{EI}(A_0)$

最大极限尺寸减其基本尺寸就是上偏差，最小极限尺寸减其基本尺寸就是下偏差。从公式(6-2a)、(6-2b)中减去公式(6-1)，然后用 $\mathrm{ES}(\overrightarrow{A_i})$ 代替 $\overrightarrow{A}_{i\max}-\overrightarrow{A_i}$ 、$\mathrm{EI}(\overline{A})$ 代替 $\overrightarrow{A}_{i\min}-\overrightarrow{A_i}$ ，用 $\mathrm{ES}(\overleftarrow{A_i})$ 代替 $\overleftarrow{A}_{i\max}-\overleftarrow{A_i}$ 、$\mathrm{EI}(\overline{A})$ 代替 $\overleftarrow{A}_{i\min}-\overleftarrow{A_i}$ ，得到：

$$\mathrm{ES}(A_0)=\sum_{i=1}^{m}\mathrm{ES}(\overrightarrow{A_i})-\sum_{i=m+1}^{n-1}\mathrm{EI}(\overleftarrow{A_i}) \tag{6-3a}$$

$$\mathrm{EI}(A_0)=\sum_{i=1}^{m}\mathrm{EI}(\overrightarrow{A_i})-\sum_{i=m+1}^{n-1}\mathrm{ES}(\overleftarrow{A_i}) \tag{6-3b}$$

式中　$\mathrm{ES}(\overrightarrow{A_i})$ 和 $\mathrm{ES}(\overleftarrow{A_i})$——尺寸 $\overrightarrow{A_i}$ 和 $\overleftarrow{A_i}$ 的上偏差；

$\mathrm{EI}(\overline{A})$ 和 $\mathrm{EI}(\overline{A})$——尺寸 $\overrightarrow{A_i}$ 和 $\overleftarrow{A_i}$ 的下偏差。

4．封闭环的公差

从公式(6-3a)减去公式(6-3b)(或从公式(6-2a)减去公式(6-2b))，可得：

$$A_{0\max}-A_{0\min}=(\sum_{i=1}^{m}\overrightarrow{A}_{i\max}-\sum_{i=1}^{m}\overrightarrow{A}_{i\min})+(\sum_{i=m+1}^{n-1}\overleftarrow{A}_{i\max}-\sum_{i=m+1}^{n-1}\overleftarrow{A}_{i\min})$$

即

$$T(A_0)=\sum_{i=1}^{m}T(\overrightarrow{A_i})+\sum_{i=m+1}^{n-1}T(\overleftarrow{A_i}) \tag{6-4}$$

式中　$T(A_0)$——封闭环的公差；

$T(\overrightarrow{A_i})$和$T(\overleftarrow{A_i})$——尺寸$\overrightarrow{A_i}$和$\overleftarrow{A_i}$的公差。

上面的公式(6-1)~(6-4)就是按极大极小值法解算尺寸链时所用的基本公式。在这里必须特别指出公式(6-4)的重要性，它说明：封闭环的公差等于各组成环公差之和。这也就进一步说明了尺寸链的第 2 个特征：关联性。可见，为了能经济合理地保证封闭环精度，组成环数越少越有利。

用上面的公式来解算图 6.6(b)所示尺寸链的封闭环 A_0。把相应的数值代入公式(6-1)、(6-3a)、(6-3b)、(6-4)中，得到：

$$A_0=\overrightarrow{A_1}-\overleftarrow{A_2}=(50-10)\text{mm}=40\text{mm}$$

$$ES(A_0)=ES(\overrightarrow{A_1})-EI(\overleftarrow{A_2})=0-(-0.36)\text{mm}=+0.36\text{mm}$$

$$EI(A_0)=EI(\overrightarrow{A_1})-ES(\overleftarrow{A_2})=(-0.17-0)\text{mm}=-0.17\text{mm}$$

$$T(A_0)=T(\overrightarrow{A_i})+T(\overleftarrow{A_i})=(0.36+0.17)\text{mm}=0.53\text{mm}$$

所以当大孔的深度为尺寸链的封闭环时，其基本尺寸及上、下偏差是 $40^{+0.36}_{-0.17}$ mm。

把公式(6-1)、(6-3a)、(6-3b)、(6-4)改写成表 6-1 所示的竖式。在“增环”这一行中抄入尺寸 A_1 及其上、下偏差，在“减环”这一行中把尺寸 A_2 的上、下偏差的位置对调，并改变其正负号(原来的正号改负号，原来的负号改正号)，同时给减环的基本尺寸也冠以负号，然后把三列的数值作代数和，即得到封闭环的基本尺寸、上偏差及下偏差。在这种竖式中对增环、减环的处理可归纳成一句口诀：“增环，上、下偏差照抄；减环，上、下偏差对调、变号”，由此可使尺寸链的计算更为简明。这个竖式主要用于验算封闭环。

表 6-1　计算封闭环的竖式　　单位：mm

	基本尺寸	ES	EI
增环	+50	0.00	−0.17
减环	−10	+0.36	0.00
封闭环	40	+0.36	−0.17

同样，对图 6.6(c)的尺寸链按照题意为已知封闭环 A_0 求解一个组成环 A_2。

因为 $A_0=\overrightarrow{A_1}-\overleftarrow{A_2}$

所以 $\overleftarrow{A_2}=\overrightarrow{A_1}-A_0=(50-10)\text{mm}=40\text{mm}$

因为 $\text{ES}(A_0)=\text{ES}(\overrightarrow{A_1})-\text{EI}(\overleftarrow{A_2})$

所以 $\text{EI}(\overleftarrow{A_2})=\text{ES}(\overrightarrow{A_1})-\text{ES}(A_0)=0-0=0\text{mm}$

因为 $\text{EI}(A_0)=\text{EI}(\overrightarrow{A_1})-\text{ES}(\overleftarrow{A_2})$

所以 $\text{ES}(\overleftarrow{A_2})=\text{EI}(\overrightarrow{A_1})-\text{EI}(A_0)=((-0.17)-(-0.36))\text{mm}=+0.19\text{mm}$

于是，当大孔的深度为尺寸链的组成环时，其基本尺寸及上、下偏差应是 $40^{+0.19}_{0}$ mm。

可见，由于度量基准与设计基准不重合，同一个工艺尺寸的上、下偏差也就不同。

在解算尺寸链时，会碰到两种比较麻烦的情况。

(1) 在求其一组成环的公差时得到零值或负值(或上偏差小于下偏差)的结果，即其余组成环的公差之和等于或已大于封闭环的公差。由于在机械制造中，零公差或负公差是不可能的，因此，必须根据工艺可能性重新决定其余组成环的公差，即紧缩它们的制造公差、提高其加工精度。

(2) 设计工作中，通常是根据已给定的封闭环的公差，决定各组成环的公差。解决这类问题可以有三种方法。

① 按等公差值的原则分配封闭环的公差，即：

$$T(\vec{A}_i)=T(\overleftarrow{A}_i)=\frac{T(A_0)}{n-1} \tag{6-5}$$

这种方法在计算上比较方便，但从工艺上讲是不够合理的，可以有选择地使用之。

② 按等公差级的原则分配封闭环的公差，即各组成环的公差根据其基本尺寸的大小按比例分配，或是按照公差表中的尺寸分段及某一公差等级，规定组成环的公差，使各组成环的公差符合下列条件：

$$\sum_{i=1}^{m}T(\vec{A}_i)+\sum_{i=m+1}^{n-1}T(\overleftarrow{A}_i)\leqslant T(A_0) \tag{6-6}$$

最后加以适当的调整。这种方法从工艺上讲是比较合理的。

③ 组成环的公差亦可以按照具体情况来分配。这与设计工作经验有关，但实质上仍是从工艺的观点考虑的。

如前所述，减少组成环的环数即可放宽组成环的公差，有利于零件的加工。这就要求改变零部件的结构设计，减少零件数目(即从改变装配尺寸链着手，使组成环尽量少)，或改变加工工艺方案以改变工艺尺寸链的组成，减少尺寸链的环数。可见，这一措施是经济合理地保证和提高封闭环精度的一种有效方法。

确定了组成环的公差值以后，就可按工艺上的习惯决定上、下偏差的数值，并校核上、下偏差是否符合式(6-3a)、式(6-3b)，如不符合，再做适当的调整。

极值法计算考虑了组成环可能出现的最不利情况，计算结果是绝对可靠的，而且计算方法简单，因此应用十分广泛。但是在成批以上生产中，各环出现极限尺寸的可能性并不大，而当尺寸链中组成环数较多时，所有各环均出现极限尺寸(如增环均为最大尺寸，减环均为最小尺寸)的可能性更小，因此用极值法计算显得过于保守，尤其当封闭环公差较小时，常使各组成环公差太小而使制造困难。此时可根据各环尺寸的分布状态，采用概率计算方法。

6.2.2 概率法

根据概率论原理，尺寸链概率法计算公式为：

$$T(A_0)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1}\xi_i^2k_i^2T_i^2} \tag{6-7}$$

式中 k_i—— 第 i 个组成环的相对分布系数，当组成环成正态分布时，$k_i=1$；

ξ_i——第 i 个组成环的传递系数。对于直线尺寸链，$|\xi_i|=1$。

知识链接

尺寸链中封闭环与组成环的关系可用方程式 $A_0 = f(A_1,\ A_2,\ \cdots,\ A_{n-1})$ 表示，若设第 i 个组成环的传递系数为 ξ_i，则 $\xi_i = \dfrac{\partial f}{\partial A_i}$，对于增环，$\xi_i$ 为正值；对于减环，ξ_i 为负值；若第 i 组成环的方向与封闭环的方向一致，$|\xi_i|=1$；若成一角度，$1>|\xi_i|>0$；若垂直，$\xi_i=0$。

对于直线尺寸链，当各组成环在其公差内呈正态分布时，封闭环也呈正态分布。则封闭环公差为：

$$T(A_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} T_i^2} \tag{6-8}$$

如按等公差法进行公差分配，则各组成环的平均公差为：

$$T_M(\vec{A}_i) = T_M(\overleftarrow{A}_i) = \frac{T(A_0)}{\sqrt{n-1}} \tag{6-9}$$

与式(6-5)比较，可见概率法计算的各组成环平均公差放大了 $\sqrt{n-1}$ 倍，这样，加工变得容易了，加工成本也随之下降。

各环的平均尺寸计算公式为：

$$A_{0M} = \sum_{i=1}^{m} \vec{A}_{iM} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{iM} \tag{6-10}$$

式中　A_{0M} —— 封闭环的平均尺寸；

$\vec{A}_{iM}$ —— 增环的的平均尺寸；

$\overleftarrow{A}_{iM}$ —— 减环的的平均尺寸。

6.3　工艺尺寸链的应用及计算

零件的加工工艺过程按工序划分，工序又被分成工步，依次通过这些工序和工步最终才能达到零件图上所规定的要求。工艺过程中各个工序或工步应保证的加工尺寸称为工艺尺寸，也称工序尺寸。这些工序之间和工步之间的工序尺寸都有一定的联系，但它们中的某些尺寸在零件图上是没有的。对于一些简单的工序尺寸可以通过查表法查出工序间公称余量和工序尺寸的经济精度来得到，但对于彼此之间具有比较复杂相互关系的工序尺寸，用上述方法是难以求出的。而工艺尺寸链正是以这些工序尺寸为研究对象，揭示它们之间的内在关系。因而工艺尺寸链就成为编制工艺规程中进行必要工艺尺寸计算的重要手段。

应用工艺尺寸链解决实际问题的关键是找出工艺尺寸之间的内在联系，确定封闭环及组成环即建立工艺尺寸链。当确定好尺寸链的封闭环及组成环后，就能运用尺寸链的计算公式进行具体计算。下面，由简到繁，通过几种典型的应用实例，分析工艺尺寸链的建立和计算方法。

6.3.1　工艺基准与设计基准不重合时工艺尺寸及其公差的计算

在制订工艺规程时，有时为了方便工件的定位或便于测量，工艺基准(定位基准或测量基准)与设计基准往往不重合，此时需要通过尺寸换算，改注有关工艺尺寸及其公差，从而按照改注后的工艺尺寸及其公差进行加工，满足零件图的原设计要求。

1. 定位基准与设计基准不重合时的工艺尺寸换算

工件在加工过程中，当被加工表面的定位基准与设计基准不重合时需要进行工艺尺寸换算。

如图 6.7 所示工件，$A_1 = 60_{-0.1}^{\ 0}$ mm，在本工序中以底面 A 定位，加工台阶面 B，保证尺寸 $A_0 = 25_{\ 0}^{+0.25}$ mm，试确定工序尺寸 A_2。

解：

(1) 确定封闭环、建立尺寸链(如图 6.7(b)所示)、判别增减环。

在本工序加工过程中，直接获得尺寸 A_2，A_0是间接获得的尺寸，所以 A_0是封闭环，A_1、A_2是组成环。

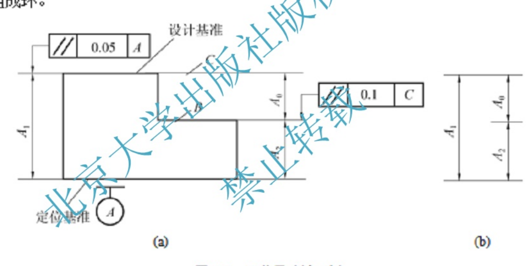


图 6.7　工艺尺寸链示例

(2) 按照极大极小值法的系列公式(6-1)~(6-4)进行计算。

因为 $A_0 = \overrightarrow{A_1} - \overleftarrow{A_2}$

所以 $\overleftarrow{A_2} = \overrightarrow{A_1} - A_0 = (60 - 25)\text{mm} = 35\text{mm}$

因为 $\text{ES}(A_0) = \text{ES}(\overrightarrow{A_1}) - \text{EI}(\overleftarrow{A_2})$

所以 $\text{EI}(\overleftarrow{A_2}) = \text{ES}(\overrightarrow{A_1}) - \text{ES}(A_0) = -0.25\text{mm}$

因为 $\text{EI}(A_0) = \text{EI}(\overrightarrow{A_1}) - \text{ES}(\overleftarrow{A_2})$

所以 $\text{ES}(\overleftarrow{A_2}) = \text{EI}(\overrightarrow{A_1}) - \text{EI}(A_0) = -0.1\text{mm}$

即：

$A_2 = 35_{-0.25}^{-0.1} = 34.9_{-0.15}^{\ 0}\,(\text{mm})$，

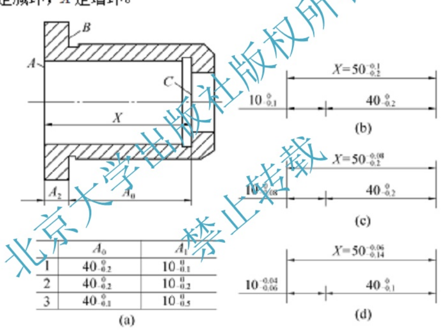
$T(A_2) = 0.15\,(\text{mm})$。

2．定位基准与测量基准不重合时的工艺尺寸换算

在零件加工时，有时会遇到一些表面加工之后，按设计尺寸不便直接测量的情况，因此需要在零件上另选一易于测量的表面作测量基准进行加工，以间接保证设计尺寸要求。这时就需要进行工艺尺寸换算。

如前所述，图 6.6 所示的套筒零件，设计时根据装配图要求，标注了如图 6.6(a)所示的轴向尺寸 $10_{-0.36}^{\ 0}$ mm 和 $50_{-0.17}^{\ 0}$ mm，可是，在具体加工时往往先加工外圆、车端面，保证全长 $50_{-0.17}^{\ 0}$ mm，再钻孔、镗孔。由于测量 $10_{-0.36}^{\ 0}$ mm 比较困难，所以总是用深度游标卡尺直接测量大孔深度。此加工过程中的计算就是定位基准与测量基准不重合时的工艺尺寸换算。

又如图 6.8 所示的轴承碗，当以端面 B 定位车削内孔端面 C 时，图样中标注的设计尺寸 A_0 不便直接测量。如果先按尺寸 A_1 的要求车出端面 A，然后以 A 面为测量基准去控制尺寸 X，则设计尺寸 A_0 即可间接获得。在上述 3 个尺寸 A_0、A_1 和 X 所构成的尺寸链中，A_0 是封闭环，A_1 是减环，X 是增环。



	A_0	A_1
1	$40_{-0.2}^{\ 0}$	$10_{-0.1}^{\ 0}$
2	$40_{-0.2}^{\ 0}$	$10_{-0.2}^{\ 0}$
3	$40_{-0.1}^{\ 0}$	$10_{-0.5}^{\ 0}$

图 6.8　测量基准与设计基准不重合的尺寸换算

为了全面地了解尺寸换算中的问题，可以将图样中的设计尺寸 A_0、A_1 给出 3 组不同的公差，看看会出现什么样的情况。

(1) 当 $A_0=40_{-0.2}^{\ 0}$ mm，$A_1=10_{-0.1}^{\ 0}$ mm 时，求解车内孔端面 C 的尺寸 X 及其公差。

按式(6-1)求基本尺寸 X：

因为 $40=X-10$，所以 $X=(40+10)\text{mm}=50\text{mm}$

按式(6-3a)求上偏差 ES(X)：

因为 $0=\text{ES}(X)-(-0.1)$，所以 $\text{ES}(X)=-0.1\text{mm}$

按式(6-3b)求下偏差 EI(X)：

因为 $-0.2=\text{EI}(X)-0$，所以 $\text{EI}(X)=-0.2\text{mm}$

最后求得：$X=50_{-0.2}^{-0.1}$ mm，如图 6.8(b)所示。

(2) 当 A_0=40$_{-0.2}^{\ 0}$ mm， A_1=10$_{-0.2}^{\ 0}$ mm，如仍采用上述工艺进行加工，则因组成环 A_1 公差和封闭环 A_0 的公差相等，按式(6-4)求得 X 的公差为零，即尺寸 X 要加工得绝对准确，这实际上是不可能的。因此必须压缩尺寸 A_1 的公差，设 A_1=10$_{-0.08}^{\ 0}$ mm，按照公式求解 X 的值为：$X=50_{-0.2}^{-0.08}$ mm，如图 6.8(c)所示。

(3) 当 A_0=40$_{-0.1}^{\ 0}$ mm， A_1=10$_{-0.5}^{\ 0}$ mm时，由于组成环 A_1 的公差远大于封闭环 A_0 的公差，如仍采用上述工艺进行加工，根据封闭环公差应大于或等于各组成环公差之和的关系，应压缩 A_1 的公差，考虑到加工内孔端面 C 比较困难，应给它留较大的公差，故应大幅度压缩 A_1 的公差。设 T_1＝0.02mm，并取 A_1=10$_{-0.06}^{-0.04}$mm，则同样用上述方法可求得 $X=50_{-0.14}^{-0.06}$ mm，如图 6.8(d)所示。

从上述 3 组尺寸的换算可以看出：通过尺寸换算来间接保证封闭环的要求，必须要提高组成环的加工精度。当封闭环的公差较大时(如第一组设计尺寸)，仅需提高本工序(车端面)的加工精度；当封闭环的公差等于甚至小于一个组成环的公差时(如第二组或第三组尺寸)，则不仅要提高本工序尺寸 X 的加工精度，而且要提高前工序(或工步) A_1 的加工精度。例如第三组的尺寸 A_1 换算后的公差为 0.02mm，仅为原设计公差 0.5mm 的二十五分之一，大大提高了加工要求，增加了加工的困难，因此，工艺上应尽量避免测量上的尺寸换算。

还要指出，按换算后的工序尺寸进行加工(或测量)以间接保证原设计尺寸的要求时，还存在一个“假废品”的问题，例如：当按图 6.8(b)所示的尺寸链所解算的尺寸 $X=50_{-0.2}^{-0.1}$ mm 进行加工时，如某一零件加工后实际尺寸 X＝49.95mm，较工序尺寸的上限超差 0.05mm，从工序上看，此件即应报废。但如将零件的 A_1 实际尺寸再测量一下，如 A_1＝10mm，则封闭环尺寸 A_0＝49.95mm−10mm＝39.95mm，仍符合设计尺寸 40$_{-0.2}^{\ 0}$ mm 的要求。这就是工序上报废而产品仍合格的所谓“假废品”问题。为了避免“假废品”的出现，对换算后工序尺寸超差的零件，应按设计尺寸再进行复量和验算，以免将实际合格的零件报废而造成浪费。

6.3.2　工序间尺寸和公差的计算

零件在加工过程中，其他工序尺寸及偏差均为已知，求某工序的尺寸及其偏差，称为中间工序尺寸计算。

1. 内孔及键槽的工序尺寸链

如图 6.9 所示工件，有一带有键槽的内孔要淬火及磨削，则插键槽的深度成为工序尺寸。图 6.8(a)表示键槽深度的设计尺寸 $H=62_{\ 0}^{+0.25}$ mm，有关内孔及键槽的加工顺序如下。

工序 1：镗内孔至 $D_1=\phi57.75_{\ 0}^{+0.03}$ mm。

工序 2：插键槽，保证尺寸 x。

工序 3：热处理。

工序 4：磨内孔至 $D_2=\phi58_{\ 0}^{+0.03}$ mm，同时保证尺寸 $H=62_{\ 0}^{+0.25}$ mm。

试确定工序尺寸 x 的大小及偏差。

解：

(1) 确定封闭环、建立尺寸链、判别增减环。

显然，H 是间接保证的尺寸，是封闭环。作出工艺尺寸链如图 6.9(b)所示。

其组成环为：磨孔后的半径尺寸 $R_2=\phi29.5^{+0.015}_{0}$ mm 是增环；镗孔后的半径尺寸 $R_1=\phi28.875^{+0.015}_{0}$ mm 是减环；插键槽尺寸 x 是增环，也是要求的工序尺寸。

也可作出工艺尺寸链如图 6.9(c)所示，图 6.9(c)是将图 6.9(b)的尺寸链分成两个三环尺寸链，并引进了半径余量 $Z/2$。从图 6.9(c)的左图中可以看到 $Z/2$ 是封闭环，在右图中，则 H 是封闭环，$Z/2$ 是组成环，由此可见，要保证 $H=62^{+0.25}_{0}$ mm，就要控制工序余量 Z 的变化，而要控制这个余量的变化，就又要控制它的组成环 R_1、R_2 的变化。工序尺寸 x 可以由图 6.9(b)解出，也可由图 6.9(c)解出。但往往是前者便于计算，后者利于分析。

(2) 对图 6.9(b)按照极大极小值法的系列公式(6-1)~(6-4)进行计算。

求得 x 如下：

$x=61.875^{+0.235}_{+0.015}=61.89^{+0.22}_{0}$ mm

$T(X)$=0.22mm

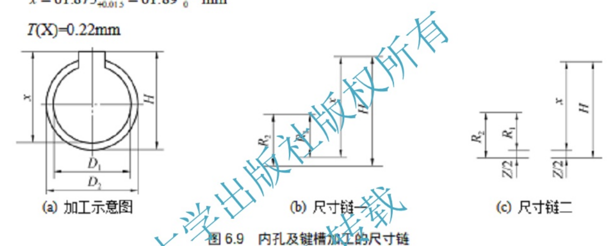


图 6.9　内孔及键槽加工的尺寸链

计算完毕，可以用表格竖式法进行验算，见表 6-2。

表 6-2　计算封闭环的竖式　　单位：mm

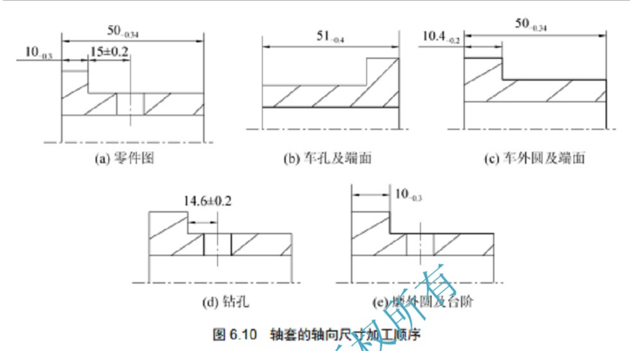
	基本尺寸	ES	EI
增环	+29	+0.015	0
增环	+61.875	+0.235	+0.015
减环	−28.875	0	−0.015
封闭环	62	+0.25	0

特别提示

工序余量并不绝对是封闭环。

2. 多尺寸保证时的尺寸换算

如图 6.10 所示轴套零件，其轴向的设计尺寸 $10^{0}_{-0.3}$ mm、$50^{0}_{-0.34}$ mm、15mm±0.2mm。轴套的加工工序如图所示。



(a) 零件图 (b) 车孔及端面 (c) 车外圆及端面

(d) 钻孔 (e) 磨外圆及台阶

图 6.10 轴套的轴向尺寸加工顺序

工序 1：车内孔及端面，工序尺寸为 $51_{-0.4}^{\ 0}$ mm。

工序 2：车外圆及端面，工序尺寸为 $50_{-0.34}^{\ 0}$ mm、$10.4_{-0.2}^{\ 0}$ mm。

工序 3：钻孔，工序尺寸为 14.6±0.2mm。

工序 4：磨外圆及台阶，工序尺寸为 $10_{-0.3}^{\ 0}$ mm。

试校验工序尺寸标注是否合理。

解：(1) 确定封闭环、建立尺寸链、判别增减环。

从工序图中可以看出，零件图上的设计尺寸 $10_{-0.3}^{\ 0}$ mm、$50_{-0.34}^{\ 0}$ mm 是工序 2 及工序 4 的工序尺寸，已经在加工过程中得到直接保证，现需确定零件图上的设计尺寸 15mm±0.2mm 在加工过程中能否得到保证。随着工序 2、工序 3 和工序 4 的加工，直接得到 $10.4_{-0.2}^{\ 0}$ mm、14.6mm±0.2mm、$10_{-0.3}^{\ 0}$ mm 这 3 个尺寸，而所要求的设计尺寸 15mm±0.2mm 成为最终被间接保证的尺寸，所以是封闭环，需要校验。建立尺寸链如图 6.11 所示。尺寸链中，$10.4_{-0.2}^{\ 0}$ mm、14.6mm±0.2mm 是增环，$10_{-0.3}^{\ 0}$ mm 是减环。

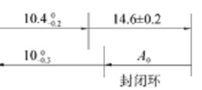


图 6.11 轴套零件尺寸链

(2) 可按照极大极小值法的系列公式(6-1)~(6-4)进行计算。也可利用表格竖式法进行计算，见表 6-3。

表 6-3 计算封闭环的竖式 单位：mm

项目	基本尺寸	ES	EI
增环	+10.4	0	−0.2
增环	+14.6	+0.2	−0.2
减环	−10	+0.3	0
封闭环	15	+0.5	−0.4

求得：$A_0=15_{-0.4}^{+0.5}$ mm(超差)

(3) 解决办法：随着工序 1、2、3 和工序 4 的加工，零件图上所要求的尺寸 15mm±0.2mm 没有得到保证。解决的办法有两种。

① 改变工艺过程，如将工序 3 改在工序 4 之后，则工序 3 和 4 的加工内容如下。

工序 3：磨外圆及台阶，工序尺寸为 $10_{-0.3}^{0}$ mm。

工序 4：钻孔，工序尺寸为 15mm±0.2mm。

② 提高加工精度，缩小组成环公差：重新标注尺寸，现将尺寸改为：$10.4_{-0.1}^{0}$ mm，14.6mm±0.1mm，$10_{-0.1}^{0}$ mm。重新校核计算，可求得：A_0=15mm±0.2 mm，符合图样要求。

6.3.3 校核工序间余量

在工艺过程中，加工余量过大会影响生产率，浪费材料，并且还会影响精加工工序的加工质量。加工余量也不能过小，过小则会造成工件局部表面加工不到，从而产生废品。因此，校核加工余量，对加工余量进行必要的调整是制定工艺规程的必不可少的工作。由于粗加工的余量较大，因此一般仅对精加工余量进行校核。

某阶梯轴，零件的轴向工艺过程如图 6.12(a)、(b)、(c)所示。

现要校核工序 3 精车 B 面的工序余量。

解：(1) 根据工艺过程作轴向尺寸形成过程及余量分布图， 如图 6.12(d)所示。

寻找封闭环，建立尺寸链，如图 6.12(e)所示。

由工艺过程可知，工序 3 精车 B 面的工序余量 Z 为封闭环，即 $Z=A_0$。判别增减环：A_2、A_3 是增环，A_4、A_5 是减环。

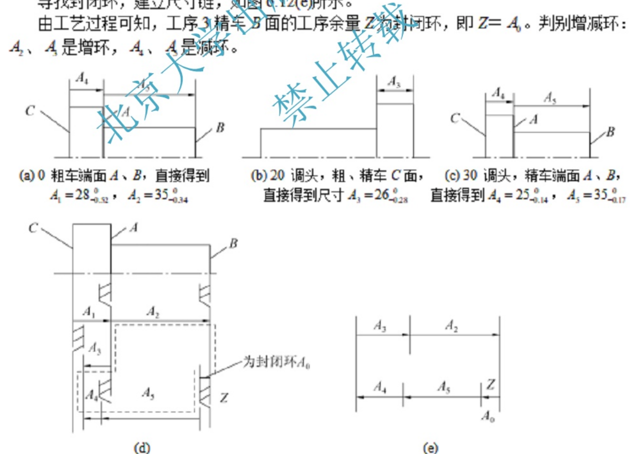


图 6.12 阶梯轴轴向尺寸的工艺过程及工序尺寸链

(2) 可按照极大极小值法的系列公式(6-1)~(6-4)进行计算。也可利用表格竖式法进行计算。

求得：$Z = 1^{+0.31}_{-0.62}$ mm

最大余量：$Z_{max} = 1.31$mm

最小余量：$Z_{min} = 0.38$mm

6.3.4　表面处理及镀层厚度工艺尺寸链

表面处理一般分两类：一类是渗入类、如渗碳、渗氮、液体碳氮共渗等；另一类是镀层类，如镀铬、镀锌、镀铜等。

对渗入类表面处理工序的工艺尺寸链计算，一般要解决的问题为：在最终加工前控制渗入层厚度，然后进行最终加工，保证在加工后能获得图样要求的渗入层厚度，显然，这里的渗入层厚度是封闭环。

对镀层类表面处理工序的工艺尺寸链计算与渗入类不同。因为通常工件表面镀层后不再进行加工，镀层厚度是通过控制电镀工艺条件来直接获得的，在这里电镀层的厚度是组成环，而工件电镀后的尺寸则是间接获得的封闭环。

如图 6.13(a)所示的偏心轴零件，表面 A 的表层要求渗碳处理，渗碳层厚度为 0.5~0.8mm，为了保证对该表面提出的加工精度和表面粗糙度要求，其工艺安排如下。

工序 1：精车 A 面，保证直径 $D_1 = \phi 38.4^{\ 0}_{-0.1}$ mm。

工序 2：渗碳处理，控制渗碳层深度 H_1。

工序 3：精磨 A 面，保证尺寸 $D_2 = \phi 38^{\ 0}_{-0.016}$ mm，即半径 R_2 为 $19^{\ 0}_{-0.008}$ mm，同时保证渗碳层厚度 0.5~0.8mm。

试确定 H_1 的数值。

(1) 确定封闭环、建立尺寸链、判别增减环。

由上面工艺安排，画出工艺尺寸链图(如图 6.13(b)所示)，磨后的渗碳层厚度为间接保证的尺寸，是尺寸链的封闭环，用 H_0 表示。用前面讲的确定增减环方法很快可以确定：H_1、R_2 为增环，R_1 为减环，各环尺寸为 $H_0 = 0.5^{+0.3}_{\ 0}$ mm，$R_2 = 19^{\ 0}_{-0.008}$ mm，$R_1 = 19.2^{\ 0}_{-0.05}$ mm；H_1 为待求尺寸。

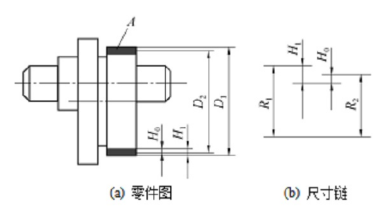
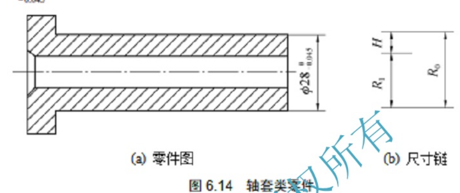


图 6.13　偏心轴渗碳磨削工艺尺寸链

(2) 可按照极大极小值法的系列公式(6-1)~(6-4)进行计算。

求得：$H_1 = 0.7^{+0.25}_{+0.008}$ mm。

图 6.14 所示轴套类零件的外表面要求镀铬，镀层厚度规定为 0.025~0.04mm，镀后不再加工，并且外径要求的尺寸为 $D_0=\phi28_{-0.045}^{0}$ mm，这样，镀层厚度和外径的尺寸公差要求只能通过控制电镀时间来保证。其工艺尺寸链如图 6.13(b)所示。轴套半径 R_0 是封闭环；镀前磨削工序的磨削半径 R_1 是待求的尺寸；镀层厚度为 $H=0.025_{0}^{+0.015}$ mm。显然，R_1 和 H 都是增环。求解尺寸链得 $R_1=17.975_{-0.0225}^{-0.015}$ mm。镀前磨削工序的工序尺寸可注成：$D_1=\phi27.95_{-0.045}^{-0.03}$ mm。



(a) 零件图 (b) 尺寸链

图 6.14 轴套类零件

工艺尺寸链应用广泛，有时还会遇到一些较为复杂的工艺尺寸换算，但其解算基础仍是单个尺寸链，可根据基准转换、工序余量变化等影响，逐个解算单尺寸链以求最终结果。

6.4 装配尺寸链

机器的装配精度是由相关零件的加工精度和合理的装配方法共同保证的。因此，如何查找那些对某装配精度有影响的零件，进而选择合理的装配方法并确定这些零件的加工精度，成了机械制造和机械设计工作中的一个重要课题。为了正确和定量地解决上述问题，就需要将尺寸链基本理论应用到装配中，即建立装配尺寸链和解装配尺寸链。

6.4.1 装配尺寸链的概念

装配尺寸链是产品或部件在装配过程中，由相关零件的相关尺寸(表面或轴线距离)或相互位置关系(平行度、垂直度或同轴度等)所组成的尺寸链。其基本特征依然是尺寸组合的封闭性，即由一个封闭环和若干个组成环所构成的尺寸链形成封闭图形。

特别提示

装配尺寸链与工艺尺寸链有所不同。工艺尺寸链中所有尺寸都分布在同一个零件上，主要解决零件加工精度问题；而装配尺寸链中每一个尺寸都分布在不同的零件上，每一个零件的尺寸就是一个组成环，有时两个零件之间的间隙也构成组成环，装配尺寸链主要解决装配精度问题。

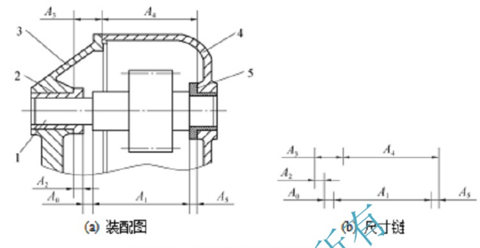
6.4.2 常用装配尺寸链的种类及建立方法

常用装配尺寸链可以按照各环的几何特征和所处的空间位置分为线性尺寸链、角度尺寸链、平面尺寸链和空间尺寸链。

1. 线性尺寸链

如图 6.15(a)所示为传动箱齿轮轴组件装配示意图。齿轮轴在左右两个滑动轴承中转动，

两轴承又分别压入左右箱体的孔内，装配精度要求是齿轮轴台肩和轴承端面的轴向间隙，其值为 $A_0 = 0.2 \sim 0.7\text{mm}$，建立以轴向间隙为装配精度的尺寸链。



(a) 装配图　　　(b) 尺寸链

图 6.15　传动箱齿轮轴组件装配示意

1—齿轮轴　2—左滑动轴承　3—左箱体　4—右箱体　5—右滑动轴承

一般建立尺寸链的步骤如下。

1) 确定封闭环

在装配尺寸链中，封闭环就是装配过程中最后形成的那个尺寸环。而装配精度是装配后所得的尺寸环，所以装配精度就是封闭环。图 6.15(a)所示为传动箱齿轮轴组件，传动轴在两个滑动轴承中转动，为避免轴端与滑动轴承端面发生摩擦，因此在轴向要有一定的间隙。这一间隙是装配过程最后形成的环，也是装配精度要求，所以它是装配尺寸链的封闭环，装配精度要求 $A_0 = 0.2 \sim 0.7\text{mm}$。

2) 查找组成环

装配尺寸链的组成环是相关零件的相关设计尺寸，它的变化会引起封闭环的变化(即某一装配精度的变化)。因此，对于一个既定的机构，与一项装配精度有关的组成环应该是一定的。查找组成环的方法是：从封闭环的一端出发，按逆时针方向或顺时针方向，依次寻找与它相关的零件及其尺寸，直至返回到封闭环的另一端。图中的相关零件是齿轮轴 1；左滑动轴承 2；左箱体 3；右箱体 4；右滑动轴承 5。即 A_1、A_2、A_3、A_4 和 A_5，它们是以 A_0 为封闭环的装配尺寸链中的组成环。

仔细分析上面找到的组成环不难发现，其环数最少，经过的路线最短，这就是查找组成环时的“最短路线原则”又称“最少环数原则”，它是在建立装配尺寸链时应遵守的一个重要原则，要求装配尺寸链中所包括的组成环数目最少，即每一个相关零件仅以一个组成环列入，简而言之就是“一件一环”。不符合最少环数原则的后果是，组成环数无谓增加，公差分配后相对减小，从而使零件的加工精度要求提高，造成加工成本增加。例如，箱体左右的轴承孔厚度就不应该列入装配尺寸链中。

特别提示

符合最短路线原则的那些尺寸，就是零件图上应该标注的尺寸，称为“设计尺寸”。它们都有一定的精度要求，是通过装配尺寸链的解算而规定的。在零件机械加工中，由于工艺上的原因而需要通过其他尺寸来间接保证设计尺寸时，才需要经过尺寸换算而产生“工艺尺寸”。

3) 画装配尺寸链图并确定组成环的性质

利用封闭环和所找到的组成环画出尺寸链图。画尺寸链图时，应以封闭环为基础，从其尺寸的一端出发，逐一把组成环的尺寸连接起来，直到封闭环尺寸的另一端为止，这就是封闭原则。

画出装配尺寸链图以后，就可以很容易地判断出哪些组成环是增环，哪些组成环是减环。其判断方法根据定义：当其他组成环尺寸不变时，该组成环尺寸增加使封闭环尺寸也增加的就是增环；该组成环尺寸增加使封闭环尺寸减小的就是减环。或者在尺寸链中按顺时针或逆时针方向在各环上画箭头，也可以对各组成环的增减性进行判断。与封闭环箭头方向相同的组成环是减环；与封闭环箭头方向相反的组成环是增环。

上述尺寸链的组成环都是长度尺寸，有时长度尺寸链还会出现形位公差和配合间隙环。

2. 角度尺寸链

角度装配尺寸链的封闭环就是机器装配后的平行度、垂直度等技术要求。尺寸链的查找方法与长度装配尺寸链的查找方法相同。

如图 6.16 所示的装配关系中，铣床主轴中心线对工作台面的平行度要求为封闭环。分析铣床结构后可知，影响上述装配精度的有关零件包含工作台、转台、床鞍、升降台和床身等，其相应的组成环如下。

(1) A_0——车床头尾座中心线的等高线，即装配精度。

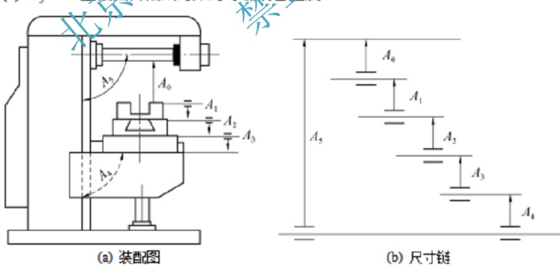
(2) A_1——工作台面对其导轨面的平行度。

(3) A_2——转台导轨面对其下支承平面的平行度。

(4) A_3——床鞍上平面对其下导轨面的平行度。

(5) A_4——升降台水平导轨对床身导轨的垂直度。

(6) A_5——主轴回转轴线对床身导轨的垂直度。



(a) 装配图　　　(b) 尺寸链

图 6.16　铣床主轴中心线对工作台面的平行度要求

为了将呈垂直度形式的组成环转化成平行度形式。可作一条和床身导轨垂直的理想直线。这样，原来的垂直度就转化为主轴轴心线和升降台水平导轨相对于理想直线的平行度，其装配尺寸链如图 6.16(b)所示。它类似于线性尺寸链，但是基本尺寸为零，可应用线性尺寸链的有关公式求解。

3．平面尺寸链

平面尺寸链由成一定成角度关系的长度尺寸及相应的角度尺寸(或角度关系)构成，且处于同一或彼此平行的平面内。

图 6.17 所示车床溜板箱装配在溜板下面时，应保证溜板箱齿轮 O_2 与溜板横进给齿轮 O_1 间有适当的啮合侧隙 P_0。影响 P_0 的有关尺寸是：溜板上齿轮的 O_1 坐标尺寸 X_1、Y_1 和溜板箱上齿轮 O_2 的坐标尺寸 X_2、Y_2，两齿轮的分度圆半径 R_1、R_2 以及偏移量 e。这些尺寸以及它们之间的角度关系构成了平面尺寸链。

4．空间尺寸链

空间尺寸链由位于空间相交平面的直线尺寸和角度尺寸(或角度关系)构成。

显然，装配后的精度(或技术要求)是通过把零、部件装配好后才最后形成的，是由相关零、部件上的有关尺寸和角度位置关系所间接保证的。因此，在装配尺寸链中，装配精度是封闭环，相关零件的设计尺寸是组成环。如何查找对装配精度有影响的相关零件，进而选择合理的装配方法并确定这些零件的加工精度，是建立装配尺寸链和求解装配尺寸链的关键。

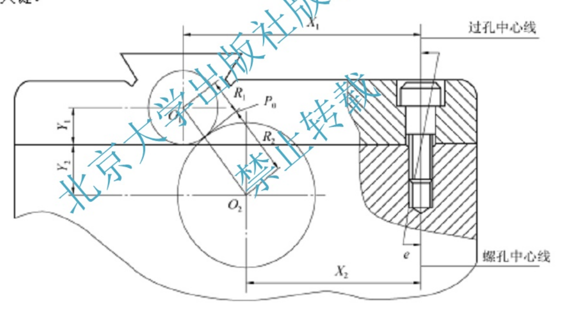


图 6.17　平面装配尺寸链

6.4.3　装配尺寸链建立时的简化问题

装配尺寸链的建立，还存在一个简化的问题，如图 6.18 所示，是一个简化尺寸链。

现在对图 6.18 中的简化尺寸链说明如下。

(1) 封闭环 A_0 是普通车床精度标准中的一项检验技术要求——主轴锥孔中心线和尾座顶尖套锥孔中心线对溜板移动的等高度。故将该尺寸链简称为车床等高度装配尺寸链。因为度量基准是床身导轨，故尺寸链中下面的一条线代表导轨，并且，确定床头箱、尾座相对位置的是床面上的平导轨，确定溜板位置的也是平导轨，所以这一条尺寸链中的直线代表平导轨。但是平导轨存在直线度误差，并非绝对平直，故这一误差被简略了。

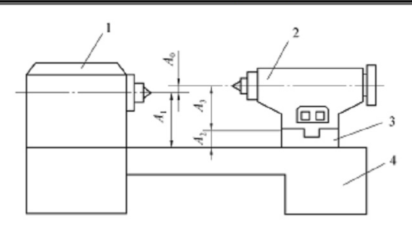


图 6.18　车床主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高结构示意

1—主轴箱　2—尾座　3—尾座底板　4—床身

(2) 组成环 A_1 上端的一条直线代表主轴锥孔轴线，确定这条轴线位置的因素包括：床头箱主轴孔到床头箱底面的高度尺寸、轴承外环内滚道对其外圆的同轴度误差、轴承内环孔对其外滚道的同轴度误差、主轴锥孔轴线对主轴颈轴线的同轴度误差。总之，尺寸 A_1 并不仅仅是床头箱上主轴孔的高度位置尺寸及其误差，而还包括一系列有关零件的同轴度误差，这些同轴度误差在尺寸链图中也没有表示出来而被简化了。

(3) 同理，尺寸 A_3 代表了尾座部件上与本项精度标准 A_0 有关的一个尺寸。这个尺寸主要取决于尾座孔到其底面的高度距离及其误差，但也包括套筒锥孔对其外圆的同轴度误差，还包括套筒外圆与尾座孔之间的间隙。因此，尺寸 A_3 的误差，除了高度尺寸误差外，还包括上述同轴度误差及间隙误差等在内。这些误差也没有在图上表示而被简化了。

总之，作为进入总装配的部件而言，在装配尺寸链图上表示的一个有关尺寸及其公差应该是有关零件尺寸与公差的综合，而在尺寸链图中可以简化为一个组成环。假如把上述简化了的因素(即组成环)都列入尺寸链图中，那么图 6.18 所示的装配尺寸链将是如图 6.19 所示形态。

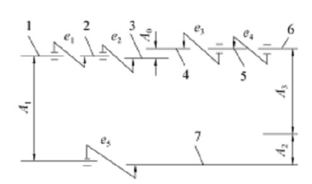


图 6.19　车床“等高度”装配尺寸链详图

其中各轴线的意义如下。

① 1—箱体主轴孔轴线。

② 2—滚动轴承外环内滚道轴线。

③ 3—主轴锥孔轴线。

④ 4—尾座套筒锥孔轴线。

⑤ 5—尾座套筒外圆轴线。

⑥ 6—尾座体孔轴线。

⑦ 7—导轨。

各组成环的意义如下。

① A_1—箱体主轴孔轴线至箱体底面的高度。

② A_2—尾座底板的厚度。

③ A_3—尾座体套筒孔轴线至尾座体底面的高度。

④ e_1—滚动轴承外环内滚道对外圆的同轴度。

⑤ e_2—主轴锥孔径向圆跳动。

⑥ e_3—尾座套筒锥孔对其外圆的同轴度。

⑦ e_4—尾座套筒与尾座孔之间的间隙。

⑧ e_5—导轨直线度。

由此可见，当 A_0 的精度要求较高时，各同轴度误差和导轨直线度误差均不能忽略。换言之，当加入这一系列误差时，组成环 A_1、A_2 和 A_3 能够分配到的公差(按 A_0 的公差要求分配)，相应地要比不加入这些误差时为小。考虑到对初学者来说，只要求概念清楚而不宜把计算实例复杂化，故在下面的尺寸链解算实例中都没有把这类误差考虑在内。只有最后一个实例才把少数必须考虑的同轴度误差画入装配尺寸链图中。

此外，还需指出，图 6.18 中的各条轴线都假定是绝对平行的，而事实上存在平行度误差。由于平行度属于另外的精度项目，有相应的检验方法予以控制，因此对本例的情况来说可以不考虑平行度误差对 A_0 的影响，而只应用线尺寸链来分析计算。只有当平行度误差对线尺寸链中的封闭环影响很大时，才需要在直线尺寸链中加入一个由平行度误差折算而得来的组成环。

还需进一步指出，本例的尺寸链中，没有考虑床身导轨扭曲误差对封闭环 A_0 的影响，因此，这一简化的结果，仅能得到近似解。如何精确计算这类空间几何误差？这属于进一步深入研究的问题。

以上说明了建立装配尺寸链的基本原理与方法，又指出了有关简化与近似的问题，对于初学者来说，应该着重基本概念和基本方法。

6.4.4　装配尺寸链的计算方法

装配尺寸链与工艺尺寸链都是尺寸链，有共同的形式、计算方法和解题类型。

装配尺寸链的“正计算”发生在已有产品装配图和全部零件图的情况下，即尺寸链的封闭环、组成环的基本尺寸、公差及偏差都已知，由已知的组成环的基本尺寸、公差及偏差，求封闭环的基本尺寸、公差及偏差。然后与已知条件对比，验证组成环公差、基本尺寸及其偏差的规定是否正确，是否满足装配精度指标。

装配尺寸链的“反计算”发生在产品设计阶段，根据产品装配精度要求(封闭环)，确定组成环的基本尺寸、公差及偏差；然后将这些已经确定的基本尺寸、公差及偏差标注到零件图上。

毫无疑问，正计算是极为容易的，它仅仅是将一个已经解决的“尺寸链问题”的答案作一次验算而已。反计算才真正是解装配尺寸链问题的计算。无论哪一种应用，装配尺寸

链的计算方法都有两种，即极值法和概率法。

1．极值法的补充

极值法是指在各组成环误差处于极端情况时，确定封闭环与组成环关系的一种方法。该方法简单可靠，但在封闭环公差较小、组成环环数较多的情况下，各组成环的公差可能会很小，致使加工困难，零件制造成本增加。因此，极值法主要适用于组成环的环数较少或者组成环的环数较多，但封闭环的公差较大的场合。

下面再补充一种所谓“相依尺寸公差法”(或称“中间计算法”)。相依尺寸公差法是将一些比较难以加工和不宜改变其公差的组成环的公差预先肯定下来，只将极少数或一个比较容易加工或在生产上受限制较小的组成环作为试凑对象。这样，试凑计算工作大为简化。这个环称为“相依尺寸”，意思是该环的尺寸相依于封闭环和其他组成环的尺寸及公差。于是可列计算公式：

$$T(A_0)=T(A_y)+\sum_{i=1}^{n-2}T(A_i) \tag{6-11}$$

式中　A_y——相依尺寸；

$T(A_i)$、$T(A_y)$、$T(A_0)$——分别表示组成环(相依尺寸除外)、相依尺寸及封闭环的公差。

根据同样原理可得到相依尺寸上下偏差的公式。

(1) 若相依尺寸是增环，则：

上偏差：$$\mathrm{ES}(\vec{A}_y)=\mathrm{ES}(A_0)-\sum_{i=1}^{m-1}\mathrm{ES}(\vec{A}_i)+\sum_{i=m+1}^{n-1}\mathrm{EI}(\overleftarrow{A}_i) \tag{6-12a}$$

下偏差：$$\mathrm{EI}(\vec{A}_y)=\mathrm{EI}(A_0)-\sum_{i=1}^{m-1}\mathrm{EI}(\vec{A}_i)+\sum_{i=m+1}^{n-1}\mathrm{ES}(\overleftarrow{A}_i) \tag{6-12b}$$

(2) 若相依尺寸为减环，则：

上偏差：$$\mathrm{ES}(\overleftarrow{A}_y)=-\mathrm{EI}(A_0)+\sum_{i=1}^{m}\mathrm{EI}(\vec{A}_i)-\sum_{i=m+1}^{n-2}\mathrm{ES}(\overleftarrow{A}_i) \tag{6-13a}$$

下偏差：$$\mathrm{EI}(\overleftarrow{A}_y)=-\mathrm{ES}(A_0)+\sum_{i=1}^{m}\mathrm{ES}(\vec{A}_i)-\sum_{i=m+1}^{n-2}\mathrm{EI}(\overleftarrow{A}_i) \tag{6-13b}$$

除以上公式外，也可以用竖式计算“相依尺寸”的偏差。

实例分析 6-1

图 6.20 所示为双联转子泵轴向关系简图。根据技术要求，冷态下的轴向间隙为 0.05～0.15mm。A_1=41mm，A_2= A_4=17mm，A_3=7mm。求各个组成环的公差及偏差。

(1) 分析和建立尺寸链图，如图 6.19 所示。其中 A_1 是增环，A_2、A_3、A_4 是减环，A_0 是封闭环，且有：

$A_0=0^{+0.15}_{+0.05}\text{mm}$

(2) 确定各个组成环的公差。

$T_{cp}(A_i)=\dfrac{T(A_0)}{n-1}=\dfrac{0.1}{5-1}\text{mm}=0.025\text{mm}$

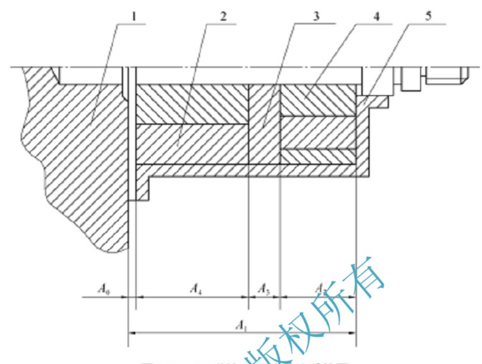


图 6.20　双联转子泵轴向关系简图

1—机体　2—外转子　3—隔板　4—内转子　5—壳体

根据加工难易程度和尺寸大小调整各个组成环的公差。尺寸 A_2、A_3、A 可用平面磨床加工，精度容易保障，故公差可规定小些，但为了便于用卡规进行测量，其公差还得符合标准公差；尺寸 A_1 采用镗削加工，尺寸较难保证，公差应给大些，并且尺寸属于深度尺寸，在成批生产中常采用通用量具而不使用极限量规测量，故可选为“相依尺寸”。由此，按单向入体原则有：

$A_2 = A_4 = 17^{0}_{-0.018}$ mm(IT7 级)

$A_3 = 7^{0}_{-0.015}$ mm(IT7 级)

(3) 计算“相依尺寸”偏差。

$$\mathrm{ES}(\vec{A}_1) = \mathrm{ES}(A_0) + \mathrm{EI}(\overleftarrow{A}_2) + \mathrm{EI}(\overleftarrow{A}_3) + \mathrm{EI}(\overleftarrow{A}_4)$$
$$=(0.15+(-0.018)+(-0.015)+(-0.018))\mathrm{mm}$$
$$=0.099\mathrm{mm}$$

$$\mathrm{EI}(\vec{A}_1) = \mathrm{EI}(A_0) + \mathrm{ES}(\overleftarrow{A}_2) + \mathrm{ES}(\overleftarrow{A}_3) + \mathrm{ES}(\overleftarrow{A}_4)$$
$$=(+0.05+0+0+0)\mathrm{mm}=0.05\mathrm{mm}$$

故“相依尺寸”为 $\vec{A} = 41^{+0.099}_{+0.05}$ mm

2．概率法的补充

概率法是指在大批、大量生产中，组成环尺寸按概率原理分布，处于极端情况下的可能性很小，从而可以用概率论理论来确定封闭环和组成环关系的一种方法。生产实践证明，加工一批零件时，其实际尺寸处于尺寸中间部分的是多数，而处于极限尺寸的零件是极少数的；而且一批零件在装配中，尤其是对于多环尺寸链的装配，同一部件的各组成环，恰

好都处于极限尺寸的情况更是少见。因此，在成批、大量生产中，当装配精度要求高，而且组成环的数目又较多时，应用概率法解算装配尺寸链比较合理，这样可以扩大零件的制造公差，从而降低制造成本。

1) 用概率法计算各环公差

根据概率论原理，独立随机变量之和的均方根偏差 σ_0 与这些随机变量相应的均方根偏差 σ_i 值有如下关系：$\sigma_0=\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1}\sigma_i^2}$。

在装配尺寸链中，其组成环(即各个零件加工尺寸的数值)是彼此独立的随机变量，因此作为组成环合成封闭环的数值也是一个随机变量。

当尺寸链中各组成环的尺寸公差分布都遵循正态分布规律时，则其封闭环也将遵循正态分布规律。此时，这个尺寸的随机误差即尺寸的分散范围，为均方根误差的 6 倍。

令尺寸的公差 $T(A_0)=6\sigma$，则封闭环公差 $T(A_0)$ 与各组成环公差 $T(A_i)$ 的关系式如公式(6-8)：$T(A_0)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1}T(A_i)^2}$。

如果零件尺寸不服从正态分布时，上式需要引入一个相对分布系数 k_i。则根据公式(6-7)有：

$$T(A_0)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1}[k_iT(A_i)]^2}$$

不同分布曲线的相对分布系数值见表 6-4。

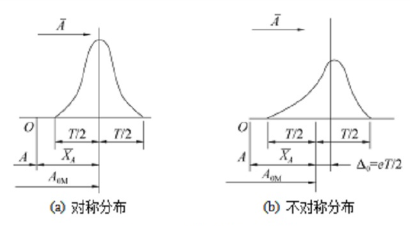
表 6-4　不同分布曲线的相对分布系数值

分布特征	正态分布	三角分布	均匀分布	瑞利分布	偏态分布	
					外尺寸	内尺寸
分布曲线				$e\frac{T}{2}$	$e\frac{T}{2}$	$e\frac{T}{2}$
e	0	0	0	−0.23	0.26	−0.26
k_i	1	1.22	1.73	1.4	−1.17	1.17

2) 用概率法计算各环平均尺寸

根据概率论原理，各环的基本尺寸是以尺寸分布的集中位置即用算术平均值 $\bar{A}$ 来表示的，所以装配尺寸链中有 $\bar{A}=\sum\overrightarrow{\bar{A}_i}-\sum\overleftarrow{\bar{A}_i}$ 即封闭环的算术平均值 $\bar{A}_0$ 等于各增环算术平均值 $\overrightarrow{\bar{A}_i}$ 之和减去各减环算术平均值 $\overleftarrow{\bar{A}_i}$ 之和。

当各组成环尺寸分布曲线属于对称分布，且分布中心与公差带中心重合时，如图 6.21(a)所示。



(a) 对称分布　　(b) 不对称分布

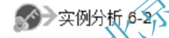
图 6.21　分布曲线尺寸计算

其尺寸分布的算术平均值 $\bar{A}$ 即等于该尺寸公差带中心尺寸，称之为平均尺寸 A_{0M} 。此时亦有：

$$A_{0M}=\sum_{i=1}^{m}\vec{A}_{iM}-\sum_{i=m+1}^{n-1}\overleftarrow{A}_{iM} \tag{6-14}$$

当各组成环尺寸分布曲线属于不对称分布时，算术平均值 $\bar{A}$ 相当于公差带中心尺寸 A_{0M} 产生一个偏差 $\Delta_0=e\dfrac{T}{2}$ ，如图 6.21(b)所示，T 为该尺寸公差；系数 e 称为相对不对称系数，表示尺寸分布的不对称度。对称分布曲线 e=0，其余见表 6-4。

按以上计算出各环公差以及各环平均尺寸 A_M 后，各环的公差对平均尺寸应标注成双向对称分布，然后根据需要，再改注成具有基本尺寸和相应上、下偏差的形式。


实例分析 6-2

利用概率法求图 6.20 双联转子泵轴中各组成环公差及偏差(设各零件加工尺寸符合正态分布)。

解：

1) 分析和建立尺寸链

封闭环尺寸为

$A_0=0^{+0.15}_{+0.05}\text{mm}$

2) 确定各组成环公差

$T_{cp}=\dfrac{T(A_0)}{\sqrt{n-1}}=\dfrac{0.1}{\sqrt{5-1}}\text{mm}=0.05\text{mm}$

用概率法计算出的公差显然比极值法计算出的公差放大了，因此各组成环公差也就放大了。根据各零件的加工难易程度，分配公差并确定 A_1 环为相依尺寸，结果如下：

$A_2=A_4=17^{\ 0}_{-0.043}\text{ mm}$；　$A_3=7^{\ 0}_{-0.037}\text{ mm}$

$$\begin{aligned}T(A_1)&=\sqrt{T(A_0)^2-T(A_2)^2-T(A_3)^2-T(A_4)^2}\\&=\sqrt{0.1^2-0.043^2-0.037^2-0.043^2}\text{mm}\\&=0.07\text{mm}\end{aligned}$$

3) 计算相依尺寸的平均尺寸

$A_{0M}=0.1\text{mm}$

$\overleftarrow{A}_{2M}=\overleftarrow{A}_{4M}=16.9875\text{mm}$

$\overleftarrow{A}_{3M}=6.9815\text{mm}$

$\overrightarrow{A}_{1M}=A_{0M}+\overleftarrow{A}_{2M}+\overleftarrow{A}_{3M}+\overleftarrow{A}_{4M}=41.0385\text{mm}$

4) 计算相依尺寸的偏差

$\overrightarrow{A}_1=\overrightarrow{A}_{1M}=\frac{T(A_1)}{2}=41.0385^{+0.035}_{-0.035}\text{mm}=41^{+0.0735}_{+0.0035}\text{mm}$

特别提示

对比极值法和概率法计算结果，概率法零件的制造公差放大了许多，可以大大降低零件制造成本。

6.4.5 装配尺寸链的解算实例

应用装配尺寸链方法解决实际问题时，首先要根据装配精度建立相应的装配尺寸链，然后合理选择达到装配精度的方法，同时应用合适的计算方法进行尺寸链解算。下面通过实例来讲解这一过程，以便理解如何根据实际情况选择装配方法并作相应的计算。

1. 在互换法中的解算实例

1) 在完全互换法中的解算实例

实例分析6-3

图6.22中轴固定齿轮在轴上旋转，要求装配后保证齿轮右端的间隙在0.10~0.35mm之间，已知：$A_1=35\text{mm}$，$A_2=14\text{mm}$，$A_3=14\text{mm}$，用完全互换法计算各组成环的公差及其尺寸误差。

分析：由题意可知，要保证的齿轮右端的间隙是在零件装配后间接形成的，为封闭环A_0。并且，在A_0与A_1、A_2、A_3组成的尺寸链中，A_1、A_2为减环，A_3为增环。

解：(1) 计算封闭环基本尺寸：

$$A_0=A_3-(A_1+A_2)=49-(35+14)\text{mm}=0\text{mm}$$

(2) 计算封闭环公差：

$$T_{A_0}=(0.35-0.10)\text{mm}=0.25\text{mm}$$

(3) 确定各组成环公差：

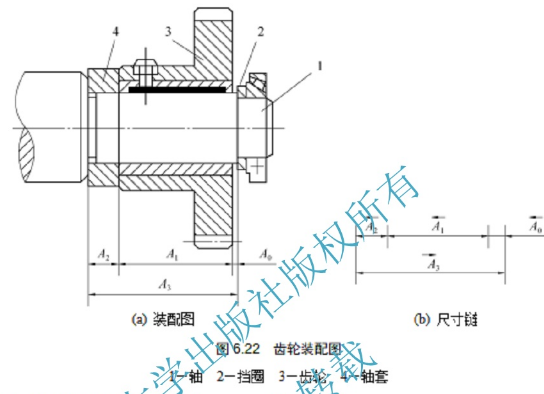
首先计算组成环平均公差：

$$T_M=\frac{T_{A_0}}{n-1}=\frac{0.25}{3}\text{mm}=0.083\text{mm}$$

考虑到各组成环基本尺寸的大小及制造难易程度各不相同，故各组成环的公差作适当

调整。因 A_1、A_3 在同一尺寸分段范围内，平均公差值接近该尺寸段的 IT10，取 IT10，故 $T_{A_1}=T_{A_3}=0.10\text{mm}$

$$T_{A_2}=T_{A_0}-T_{A_1}-T_{A_3}=0.25-0.10-0.10=0.05(\text{mm})$$



(a) 装配图　　(b) 尺寸链

图 6.22　齿轮装配图

1—轴　2—挡圈　3—齿轮　4—轴套

(4) 确定各组成环的极限偏差。

组成环的极限偏差一般按“入体原则标注”，入体方向不明的长度尺寸，其极限偏差按“对称偏差”原则配置。取：

$$A_1=35\text{h}10=35_{-0.10}^{\ 0}\text{mm}$$
$$A_3=49\text{js}10=(49\pm0.05)\text{mm}$$

各组成环的极限偏差：$\text{ES}_{A_0}=\text{ES}_{A_3}-(\text{EI}_{A_1}+\text{EI}_{A_2})$　　$\text{EI}_{A_0}=\text{EI}_{A_3}-(\text{ES}_{A_1}+\text{ES}_{A_2})$

得：$\text{EI}_{A_2}=-0.20\text{mm}$，$\text{ES}_{A_2}=-0.15\text{mm}$，$A_2=14_{-0.20}^{-0.15}\text{mm}$

标准化后：$A_2=14\text{b}9=14_{-0.193}^{-0.15}\text{mm}$

(5) 核算封闭环的极限尺寸。

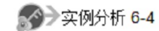
$$A_{0\max}=49.05-(34.9+13.807)=0.343\text{mm}$$
$$A_{0\min}=48.95-(35+13.85)=0.10\text{mm}$$

结果表明，封闭环尺寸符合要求，故得组成环尺寸及其极限偏差分别为：

$$A_1=35_{-0.10}^{\ 0}\text{mm}，\ A_2=14_{-0.193}^{-0.15}\text{mm}，\ A_3=(49\pm0.05)\text{mm}$$

2) 在不完全互换法中的解算实例

不完全互换装配法在大批量生产中装配精度要求高和尺寸链环数较多的情况下使用，显得更优越。该方法的尺寸链计算采用概率法。



实例分析 6-4

图 6.22 中轴固定齿轮在轴上旋转，要求装配后保证齿轮右端的间隙在 0.10~0.35mm 之间，已知：$A_1 = 35\text{mm}$，$A_2 = 14\text{mm}$，$A_3 = 49\text{mm}$，A_1、A_2、A_3 的尺寸分布均为正态分布，尺寸分布中心与公差带中心重合。试用不完全互换法计算各组成环的公差及其尺寸误差。

解：(1) 计算封闭环基本尺寸：$A_0 = A_3 - (A_1 + A_2) = 49 - (35 + 14)\text{mm} = 0\text{mm}$

(2) 计算封闭环公差：$T_{A_0} = (0.35 - 0.10)\text{mm} = 0.25\text{mm}$

(3) 确定各组成环公差：$T_M = \dfrac{T_{A_0}}{\sqrt{n-1}} = \dfrac{0.25}{\sqrt{3}}\text{mm} = 0.144\text{mm}$

与极值法得到的平均公差 T_M 相比，放大了 73.5%，有利于组成环的制造。

(4) 确定各组成环的制造公差。

以组成环平均平方差为基础，参考各组成环尺寸大小和加工难易程度，确定各组成环的制造公差。为使 A_2 便于加工，取其为协调环。

因 A_1 与 A_3 基本尺寸在同一尺寸分段范围内，平均公差值接近该尺寸段的 IT11，按 IT11 确定 A_1 与 A_3 的公差。

查表得：$T_{A_1} = T_{A_3} - 0.16\text{mm}$

则：$T_{A_2} = \sqrt{T_{A_0}^2 - T_{A_1}^2 - T_{A_3}^2} = \sqrt{0.25^2 - 0.16^2 - 0.16^2} \approx 0.106(\text{mm})$

A_2 易于加工，按 IT10 取　$T_{A_2} = 0.07\text{mm}$

按"偏差入体标注"原则，取 $A_1 = 35\text{h}11 = 35_{-0.16}^{\ 0}\text{mm}$，$A_3 = 49\text{js}11 = 49\text{mm} \pm 0.08\text{mm}$

(5) 确定协调环 A_2 的极限偏差。

由于 $\Delta_{A_0} = \Delta_{A_3} - (\Delta_{A_1} + \Delta_{A_2})$

则　$\Delta_{A_2} = \Delta_{A_3} - \Delta_{A_1} - \Delta_{A_0}$

已知 $\Delta_{A_1} = (\text{ES}_{A_1} + \text{EI}_{A_1})/2 = [0 + (-0.16)]/2\text{mm} = -0.08\text{mm}$

$\Delta_{A_3} = (\text{ES}_{A_3} + \text{EI}_{A_3})/2 = 0\text{mm}$

$\Delta_{A_0} = (\text{ES}_{A_0} + \text{EI}_{A_0})/2 = +0.25\text{mm}$

得 $\Delta_{A_2} = [0 - (-0.08) - (+0.225)]\text{mm} = -0.145\text{mm}$

$\text{ES}_{A_2} = \Delta_{A_2} + T_{A_2}/2 = (-0.145 + 0.07/2)\text{mm} = -0.11\text{mm}$

$\text{EI}_{A_2} = \Delta_{A_2} - T_{A_2}/2 = (-0.145 - 0.07/2)\text{mm} = -0.18\text{mm}$

于是　　$A_2 = 14_{-0.18}^{-0.11} = 13.89_{-0.07}^{\ 0}(\text{mm})$

(6) 核算封闭环的极限偏差：

$\Delta_{A_0} = \Delta_{A_3} - (\Delta_{A_1} + \Delta_{A_2}) = [0 - 0.08 - (-0.145)]\text{mm} = 0.225\text{mm}$

封闭环公差：$T_{A_0} = \sqrt{T_{A_1}^2 + T_{A_2}^2 + T_{A_3}^2} = \left(\sqrt{0.16^2 + 0.07^2 + 0.16^2}\right)\text{mm} = 0.24\text{mm}$

$\text{ES}_{A_0} = \Delta_{A_0} + T_{A_0}/2 = (0.225 + 0.24/2)\text{mm} = +0.345\text{mm}$

$EI_{A_0} = \Delta_{A_0} - T_{A_0}/2 = (0.225 - 0.24/2)\text{mm} = +0.105\text{mm}$

由此得 $A_0 = 0^{+0.345}_{+0.105}\text{mm}$，符合规定的装配间隙要求。

最后的组成环的极限偏差分别为

$A_1 = 35^{\ 0}_{-0.16}\text{mm}$，$A_2 = 13.89^{\ 0}_{-0.07}\text{mm}$，$A_3 = 49 \pm 0.08\text{mm}$

2．在选择装配法中的解算实例

选择装配法有 3 种：直接选配法、分组选配法和复合选配法。

这种方法的实质是将加工好的零件按实际尺寸的大小分成若干组，然后按对应组中的一套零件进行装配，同一组内的零件可以互换，分组数量越多，则装配精度就越高。零件的分组数要根据使用要求和零件的经济公差来决定。部件中各个零件的经济公差数值，可能是相同的，也可能是不相同的。在此以分组选配法为例介绍装配尺寸链的计算。

实例分析 6-5

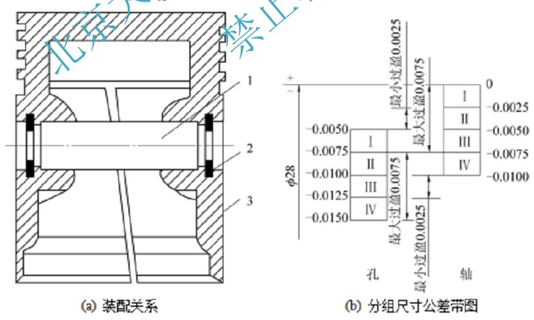
如图 6.23 所示为内燃机按基轴制的活塞销孔 D 与活塞销 d 的装配关系。根据装配技术要求，活塞销与销孔在冷态装配时，应有 0.0025～0.0075mm 的过盈量，即

$Y_{min} = D_{max} - d_{min} = -0.0075\text{mm}$

$Y_{max} = D_{min} - d_{max} = -0.0025\text{mm}$

封闭环公差 $T_0 = |Y_{max} - Y_{min}| = |-0.0075 + 0.0025|\text{mm} = 0.0050\text{mm}$

若按等公差值分配 $T_{轴} = T_{孔} = 0.0025\text{mm}$，显然，制造这样的销，是非常困难的。



(a) 装配关系　　(b) 分组尺寸公差带图

图 6.23　活塞销与活塞销孔的配合

1—销轴　2—密封件　3—活塞

实际生产中，常将销和销孔的公差同向放大到经济精度进行制造。活塞销外径尺寸由 $d = \phi 28^{\ 0}_{-0.0025}\text{mm}$ 改变至 $\phi 28^{\ 0}_{-0.010}\text{mm}$。

活塞销孔直径由 $D=\phi28^{-0.0050}_{-0.0075}$ mm 改变至 $\phi28^{-0.0050}_{-0.0015}$ mm，即均向直径减小方向将公差放大至原来的 4 倍(由公差为 0.0025mm 放大为 0.010mm)，这样，活塞销可用无心磨床加工，活塞销孔可用金刚膛床加工，然后用精密量仪测量后分组(可涂上不同颜色区别各组)，并按对应组进行装配，具体分组情况见表 6-5。分组尺寸公差带见图 6.23(b)。

表 6-5　活塞销与活塞孔的分组尺寸　　单位：mm

组别	活塞销直径	活塞销直径	配合情况		标志颜色
			最小过盈	最大过盈	
I	$\phi28^{0}_{-0.0025}$	$\phi28^{-0.0050}_{-0.0075}$	−0.0025	−0.0075	蓝
II	$\phi28^{-0.0025}_{-0.0050}$	$\phi28^{-0.0075}_{-0.0100}$			黄
III	$\phi28^{-0.0050}_{-0.0075}$	$\phi28^{-0.0100}_{-0.0125}$			白
IV	$\phi28^{-0.0075}_{-0.0100}$	$\phi28^{-0.0125}_{-0.0150}$			黑

可以看出，各对应组的公差及配合性质与原来的要求相同，即对应组内的装配满足装配精度要求。

3．在修配装配法中的解算实例

实例分析 6-6

图 6.24 所示车床主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高要求为 0~0.06mm(只允许尾座高)。设各组成环的基本尺寸 $A_1=202$mm，$A_2=46$mm，$A_3=156$mm，封闭环 $A_0=0$mm。

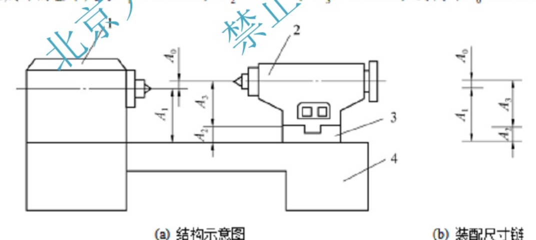


图 6.24　车床主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高结构示意

1—主轴箱　2—尾座　3—尾座底板　4—床身

解：根据题意，建立装配尺寸链如图 6.24(b)所示，其中封闭环 $A_0=0^{+0.06}_{0}$mm，$T_{A_0}=0.06$mm，A_1 为减环，A_2 和 A_3 为增环。

根据装配精度要求，此装配尺寸链如采用完全互换法计算，则名组成环公差平均值为：

$$T_M = \frac{T_{A_1}}{n-1} = \frac{0.06}{4-1}\text{mm} = 0.02\text{mm}$$

由于公差太小，给加工带来困难，不宜采用完全互换法，现采用修配装配法。计算步骤和方法如下。

(1) 选择修配环。

因组成环 A_2 尾座底板的形状简单，表面面积小，便于刮研修配，故选择 A_2 为修配环。

(2) 确定各组成环公差。

根据各组成环所采用的加工方法的经济精度确定其公差。A_1 和 A_3 采用镗模加工，取 $T_{A_1} = T_{A_3} = 0.1\text{mm}$；底板采用半精刨加工，取 $T_{A_2} = 0.15\text{mm}$。

除补偿环外，各组成环的极限偏差一般按"入体原则"确定，而 A_1 和 A_3 为孔轴线和底面的中心高尺寸，其偏差多按对称分布，故有：

$$A_1 = (202 \pm 0.05)\text{mm} \qquad A_3 = (156 \pm 0.05)\text{mm}$$

(3) 计算修配环 A_2 的尺寸及极限偏差。

判别修配环 A_2 修配时对封闭环 A_0 的影响。从图 6.23 中可知，是"越修越小"的情况。

则 $A_{2\min} = A_{0\min} - A_{3\min} + A_{1\max} = [0-(156-0.05)+(202+0.05)]\text{mm} = 46.1\text{mm}$

因 $T_{A_2} = 0.15\text{mm}$

故 $A_{2\max} = A_{2\min} + T_{A_2} = (46.1+0.15)\text{mm} = 46.25\text{mm}$

则 $A_2 = 46^{+0.25}_{+0.10}\text{mm}$

在实际生产中，为提高接触面积，A_2 精度还应考虑底板底面在总装配中必须留一定的刮研量。对底板而言，最小刮研量可留 0.1mm，故 A_2 应加大 0.1mm，即 $A_2 = 46^{+0.35}_{+0.20}\text{mm}$。

4．在调整装配法中的解算实例

实例分析 6-7

在图 6.25 所示的齿轮中，装配后要求保证间隙 $A_0 = 0.2^{+0.1}_{0}\text{mm}$。若用完全互换法装配，则 4 个组成环能够分配到的平均公差仅为 $T_{平均} = 0.1/4 = 0.025\text{mm}$，这一要求较高，制造厂认为不经济，同时又考虑到小齿轮端面与固定轴台肩中加一垫片，有利于补偿磨损，故决定采用固定补偿件调整法。又因为该机械的装配属于大批生产流水作业，要求装配迅速，有一定节奏，故垫片尺寸应事先进行计算，然后按计算尺寸制造。制造成各档尺寸的垫片，在装配时可根据实际间隙，选取相应的垫片，故称为分组垫片调整法，计算方法如下。

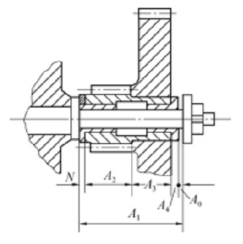


图 6.25　保证装配间隙的分组垫片调整法

表 6-6　表格竖式　　单位：mm

	ES	EI
A_1'	+0.12	0
A_2	+0.10	0
A_3	0	−0.10
A_4	+0.08	0
A_0	+0.30	−0.10

(1) 决定垫片厚度的基本尺寸及公差：

$$N = 2\text{mm}；\quad T_N = 0.02\text{mm}$$

(2) 修改结构尺寸。在原设计中：

$$A_1 = 21.2\text{mm}；\quad A_2 = 10\text{mm}；$$
$$A_3 = 10\text{mm}；\quad A_4 = 1\text{mm}$$

现将 A_1 加长，改为：

$$A_1' = A_1 + N = 21.2 + 2 = 23.2(\text{mm})$$

(3) 决定组成环性质，验算基本尺寸。可以看出：A_1 是增环；N，A_2，A_3，A_4 都是减环。

$$A_0 = A_1' - (N + A_2 + A_3 + A_4) = 23.2 - (2 + 10 + 10 + 1)\text{mm} = 0.2\text{mm}$$

(4) 确定组成环的经济公差，它们的尺寸及其极限偏差如下：

$$A_1' = 23.2^{+0.12}_{0}\text{mm}；\quad A_2 = 10^{0}_{-0.1}\text{mm}；$$
$$A_3 = 10^{+0.10}_{0}\text{mm}；\quad A_4 = 1^{0}_{-0.08}\text{mm}$$

(5) 计算超差量。用竖式计算(见表 6-6)。

得到：　$A_0' = 0.2^{+0.30}_{-0.10}\text{mm}$

即间隙变动范围是 0.1～0.5mm；$T(A_0') = 0.4\text{mm}$。所以超差量是：

$$\delta_k = T(A_0') - T(A_0) = (0.4 - 0.1)\text{mm} = 0.3\text{mm}$$

此超差量应予以补偿，故 δ_k 即称为补偿量。

(6) 确定垫片的分档数 n。假如垫片做得绝对精确，没有公差，则分档数 n 可按下式计算：

$$n = \frac{\delta_k}{T(A_0)} + 1 \tag{6-15}$$

但事实上垫片是不可能做得绝对精确的，故必须把垫片的加工公差 T_N 考虑进去，得到：

$$n = \frac{\delta_k + T_N}{T(A_0) - T_N} + 1 \tag{6-16}$$

由于 $T_N = 0.02\text{mm}$，因此得到：

$$n = \frac{0.3 + 0.02}{0.1 - 0.02} + 1 = 5$$

(7) 确定补偿范围的尺寸分档及各档垫片尺寸。因为间隙误差 $T(A_0') = 0.4\text{mm}$，共分 5 档(见表 6-7)，故各档公差为：

$$\frac{T(A_0')}{n} = \frac{0.4}{5}\text{mm} = 0.08\text{mm}$$

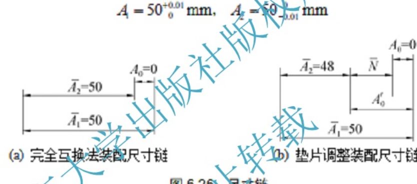
表 6-7　间隙误差分档　　　　单位：mm

组号	间隙尺寸分档	垫片尺寸及其偏差	装配后得到的间隙范围
1	2.1—2.18	$1.88^{+0.02}_{0}$	0.2—0.3
2	2.18—2.26	$1.96^{+0.02}_{0}$	0.2—0.3
3	2.26—2.34	$2.04^{+0.02}_{0}$	0.2—0.3
4	2.34—2.42	$2.12^{+0.02}_{0}$	0.2—0.3
5	2.42—2.50	$2.20^{+0.02}_{0}$	0.2—0.3

关于本例计算公式(6-23)的原理，用一简例说明如下。

图 6.26 为一三环尺寸链，A_0 为间隙，设计要求 $A_0 = 0^{+0.02}_{0}$ mm。若用完全互换装配法，则 A_1 与 A_2 所能分配到的平均公差为 $T_{平均} = 0.01$ mm，它们的基本尺寸及偏差则为：

$$A_1 = 50^{+0.01}_{0}\text{mm},\quad A_2 = 50^{0}_{-0.01}\text{mm}$$



(a) 完全互换法装配尺寸链　　(b) 垫片调整装配尺寸链

图 6.26　尺寸链

现用垫片调整法，故 A_1 与 A_2 的公差可以放大为经济公差，设放大之后尺寸与公差为：

$$A_1 = 50^{+0.03}_{0}\text{mm},\quad A_2 = 48^{0}_{-0.03}\text{mm}$$

其中因垫片厚度的基本尺寸定为 $N = 2\text{mm}$，如图 6.26(b)所示，故在 A_2 环上减去 2mm(也可在 A_1 上加 2mm，视实际结构的允许条件而定)。

如此，封闭环的尺寸与公差将为 $A_0' = 2^{+0.06}_{0}$ mm(在未加垫片时)，即 $T(A_1') = 0.06$ mm，它与设计要求的差值应由垫片来调整补偿，故此超差量又称为补偿量(δ_k)：

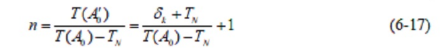
$$\delta_k = T(A_0') - T(A_0) = (0.06 - 0.02)\text{mm} = 0.04\text{mm}$$

暂假定垫片无制造误差，则可按下式计算分组数目(n)：

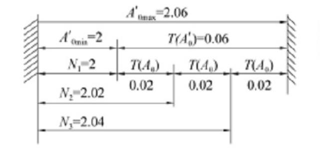
$$n = \frac{T(A_0')}{T(A_0)} = \frac{\delta_k}{T(A_0)} + 1 = \frac{0.06}{0.02} = 3$$

以上计算结果可用图解形式表示，如图 6.27(a)所示。图中 N_1、N_2 和 N_3 分别表示小、中、大三组垫片的基本尺寸。它们假定绝对正确，没有制造误差。

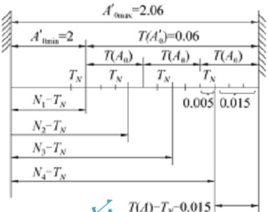
而事实上垫片不可能无制造误差，故必须规定其公差。令保证 T_N 表示垫片公差，并注意，必须 $T_N < T(A_0)$。显然，当计及 T_N 后，分组数 n 必然发生变化。由图 6.27(a)可以看出，当 N_1、N_2 和 N_3 都存在 T_N 后，它必须在分组公差带 $T(A_0)$ 中占据相应的位置。现由图解方法进行分析，如图 6.27(b)所示，便可得到计及 T_N 时的分组公式为：



$$n=\frac{T(A_0')}{T(A_0)-T_N}=\frac{\delta_k+T_N}{T(A_0)-T_N}+1 \tag{6-17}$$



(a)



(b)

图 6.27　分组垫片计算图解

本 章 小 结

本章围绕尺寸链进行了系统的阐述，介绍了工艺尺寸链和装配尺寸链的计算方法。

把互相联系的按一定顺序首尾相接构成封闭形式的一组尺寸定义为尺寸链。尺寸链的特征是封闭性和关联性。尺寸链的封闭环一定是最终被间接保证精度的尺寸，封闭环的确定是解算尺寸链的最为关键的环节。

尺寸链的计算方法有极值法和概率解法。极值法计算是考虑了各环尺寸处于极限情况下的一种计算方法。计算方法简单，因此应用十分广泛。无论是正计算，反计算，中间计算，都可以应用。

工艺尺寸链的类型多种多样，需结合具体的工艺方案有针对性地加以分析和计算。

装配尺寸链中的封闭环肯定是某项装配精度指标，装配尺寸链的计算需要结合装配工艺方法进行分析。

本章的重点是掌握极值法解尺寸链的基本过程。

习　　题

(1) 什么是尺寸链？尺寸链有哪些特征？

(2) 尺寸链的增、减环如何判定？

(3) 装配尺寸链与工艺尺寸链相比，有哪些特点？

(4) 如图 6.28 所示尺寸链，若 $A_1=A_2=A_3=(50+0.1)$mm，$A_4=(20\pm0.05)$mm，$A_5=A_6=70$mm−0.1mm，求封闭环 A_0 尺寸及上下偏差。

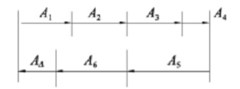


图 6.28　多环尺寸链

(5) 如图 6.29 所示，加工阶梯轴，先加工小头，保证尺寸 $A=15^{+0.1}_{0}$ mm，然后以右端面定位加工左端面，保证尺寸 $B=40^{+0.15}_{0}$ mm，求零件大头尺寸 C 及上下偏差。

(6) 图 6.30 所示内圆磨头壳体，其设计要求为 $A_1=52^{\ 0}_{-0.1}$ mm，$A_2=100^{\ 0}_{-0.3}$ mm，$A_3=32^{\ 0}_{-0.15}$ mm。加工中 A_2 不便直接测量。若判断 A_2 是否合格，应测量哪些尺寸？请给出有关尺寸的上下偏差。

(7) 如图 6.31 所示零件，成批生产时从左端面 B 为定位基准加工缺口，以保证尺寸 $A=10^{+0.20}_{0}$ mm。试标注铣此缺口时的工序尺寸及其公差。

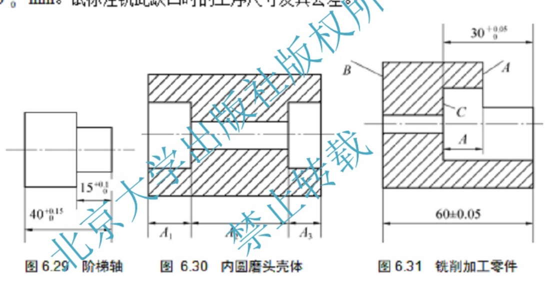


图 6.29　阶梯轴　　图 6.30　内圆磨头壳体　　图 6.31　铣削加工零件

第 7 章　机床夹具简介

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握机床夹具的基础知识	工件的装夹，机床夹具的组成，夹具装夹时保证加工精度的条件，机床夹具的分类与作用	40%	
掌握工件在夹具中的定位原理与常用定位方式	六点定位基本原理，定位元件的选择与设计	40%	
了解常用夹紧装置的特点	常用夹紧机构	10%	
了解机床夹具设计的一般步骤	机床夹具设计的一般步骤	10%	

引例

在对具有复杂形状的零件进行加工时，如何保持加工时，它和切削刃之间处于正确的相对运动状态，是一个很现实的问题。为了解决这个问题，人们研制了各种各样的机床夹具。

右图所示的是一个车床夹具，图片上右前方部分为在车床上精镗的汽车雨刷电机壳体的轴承室。为什么采用这样的装置就可以在车床上对该工件进行正确的加工？可结合本章的学习内容进行思考。



车床夹具

7.1　概　　述

7.1.1　工件的安装

在金属切削机床上进行加工时，为了保证工件加工表面的尺寸、几何形状和相互位置精度等要求，在加工方法确定以后，需要解决的主要问题之一是，使工件相对于刀具和机床占有正确的加工位置(即工件的定位)，并把工件压紧夹牢，以保持这个确定了的位置在加工过程中稳定不变(即工件的夹紧)，这就是工件在机床上的正确安装。安装=定位+夹紧。

特别提示

定位与夹紧的区别：定位是使工件占有一个正确的位置，夹紧是使工件保持这个正确位置。夹具设计是机械加工中一项重要工作。

7.1.2　机床夹具的组成

机床夹具虽然分成不同的类型，但它们的工作原理基本上是相同的。如将各种类型中作用相同的元件或机构加以概括，则可以得出夹具一般有如下几个组成部分，这些组成部分既互相独立又互相联系。

1. 定位元件或装置

这种装置包括定位元件或元件的组合。它的作用是确定工件在夹具中的位置。如图 7.1 中的 2 销轴，它使一批工件在夹具中占有同一位置，只要将工件的定位基面与夹具上的定位元件相接触或相配合，就可以使工件定位。有些夹具还采用由一些零件组成的定位装置对工件进行定位。

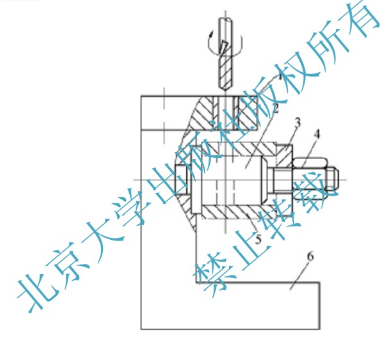


图 7.1　夹具的组成

1—钻套　2—销轴　3—开口垫圈
4—螺母　5—工件　6—夹具体

2. 夹紧元件或装置

这种装置包括夹紧元件或其组合和动力源。其作用是将工件压紧夹牢，保证工件在定位时所占据的位置在加工过程中不因受外力而产生位移，同时防止或减少振动。

3. 对刀及导引元件或装置

这类元件的共同作用是保证工件与刀具之间的正确加工位置，根据应用情况又可分为两类。

(1) 用于确定刀具位置并引导刀具进行加工的元件，称为导向元件，例如：钻套、镗套等。

(2) 用于确定刀具在加工前正确位置的元件，称为对刀元件，如：铣床、镗床上的对刀块等。

4. 夹具体

夹具体由夹具的基座和骨架组成。定位装置、夹紧机构及其他装置或元件都安装在夹具体上，使之成为一个夹具整体。夹具体除用于连接夹具上的各种元件和装置外，还用于夹具与机床装夹面连接，以确定夹具对机床工作台、导轨或主轴的相互位置。

5. 其他装置或元件

其他装置或元件是指除了上述元件或装置以外的元件或装置。如某些夹具上的分度装置、防错(防止工件错误安装)装置、安全保护装置、为了便于卸下工件而设置的顶出器以及标准化了的连接元件等。

特别提示

上述的各组成部分不是每个夹具都必须完全具备的。但一般来说，定位装置、夹紧机构、夹具体是夹具的基本组成部分。

7.1.3 夹具装夹时保证加工精度的条件

要保证工件的加工精度，必须保证工艺系统各环节之间具有正确的几何关系。为此必须满足以下3个条件。

1. 工件在夹具中有正确的定位

通过工件定位基准面和夹具定位表面的接触或配合，使同一批的各个工件装上夹具之后在夹具上占有确定的位置。

2. 夹具对机床具有正确的相互位置关系

夹具的定位表面和夹具在机床上的装夹基面之间要有一定的相互位置要求，通过夹具装夹基面和机床的有关表面(称装夹面)的连接，使夹具的定位面相对于机床工作台和导轨或主轴轴线具有正确的相互位置关系。

3. 夹具对刀具的正确调整

由于夹具上导向元件或对刀装置的工作面和夹具的定位表面之间有尺寸联系，故通过夹具对刀具相对位置的调整，使夹具定位表面相对于刀具获得正确的位置尺寸。

7.1.4 机床夹具的分类与作用

1. 机床夹具的分类

夹具的分类方法比较多，一般可分为通用夹具和专用夹具。近年来为适应现代机械制造产品改型快、新品种多、小批量生产的特点，除使用专用夹具外，还发展了通用可调夹具、成组夹具、组合夹具和随行夹具等类型。

1) 按夹具的使用范围分类

(1) 通用夹具。一般是指通用机床上所附有的一些使用较广泛的夹具，如车床、磨床上用的三爪和四爪卡盘、顶尖和鸡心夹头，铣床、刨床上用的平口钳、回转工作台、万能分度盘，平面磨床上用的磁力工作台等。它们在使用上有很大的通用性，往往无需调整或

稍加调整(包括配换个别零件)就可以装夹不同的工件。这类夹具一般已标准化，由专业工厂生产作为机床附件供用户使用。

通用夹具主要用于单件和中小批生产，装夹形状比较简单和加工精度要求不太高的工件。在大批、大量生产中，对形状复杂或加工精度要求较高的工件，往往由于操作麻烦和装夹效率低而很少采用这类夹具。

(2) 专用夹具。专用夹具是指专为某一工件的某道工序的加工而设计制造的夹具。此类夹具一般不考虑通用性，以便使夹具设计得结构简单、紧凑、操作迅速和维修方便。专用夹具通常由使用厂根据工件的加工要求自行设计和制造，生产准备周期较长。当生产的产品或零件工艺过程变更时，往往无法继续使用，故此类夹具只适用于在产品固定和工艺过程稳定的大批大量生产中使用。

(3) 成组夹具和通用可调夹具。在生产中，有时由于加工批量较小，为每种零件分别设计专用夹具很不经济，而使用通用夹具又往往不能满足加工精度和生产率的要求，故而采用成组加工工艺，并根据成组工艺设计成组夹具。用于相似零件的成组加工所用的夹具，称为成组夹具。这类夹具的特点是夹具的部分元件可以更换，部分装置可以调整，以适应不同零件的加工。通用可调整夹具与成组夹具相比，加工对象不很明确，适用范围更广一些。成组夹具是在成组技术的发展过程中而发展起来的。通用可调整夹具是单独发展的。它们是用于成组加工的两种结构相似的夹具，其共同点是：可调整、可加工多个零件。

(4) 组合夹具。这类夹具是由一套完全标准化的元件，根据零件的加工要求拼装而成的夹具。就好像搭积木一样，不同元件的不同组合和连接，可构成不同结构和用途的夹具。这类夹具的特点是灵活多变，万能性强，制造周期短，元件可以重复使用，因此特别适合于新产品试制和单件小批生产。

(5) 随行夹具。这是一种在自动线或柔性制造系统中使用的夹具。工件装夹在随行夹具上，除完成对工件的定位和夹紧外，还载着工件由运输装置送往各机床，并在各机床上被定位和夹紧。

2) 按夹具上的动力源分类

(1) 手动夹具。此类夹具是以操作工人手臂之力作为动力源，通过夹紧机构夹紧工件。为了尽量减轻工人的劳动强度和保证夹紧工件的可靠性，此类夹具的夹紧机构应该有增力和自锁作用。手动夹具一般采用结构简单的螺旋或偏心压板机构，制造方便，但使用时的工作效率较低。

(2) 气动夹具。此类夹具是用压缩空气作为动力源，通过管道、气阀、气缸等元件，产生夹紧工件的夹紧力，当需要较大的夹紧力时，常在气缸和夹紧元件之间增设斜楔式、铰链式或杠杆式等扩力机构。因气动夹具的夹紧动作迅速、夹紧力稳定、操作方便，故在机械加工中得到广泛的应用。

(3) 液压夹具。此类夹具是用压力油作为动力源，通过管道、液压阀、液压缸等元件，产生夹紧工件的夹紧力。液压夹具具有气动夹具的各种优点，而夹紧动作则更为平稳。采用较高油压的液压夹具，一般不用增力机构即可直接夹紧工件，因而结构简单，体积较小。

(4) 电动夹具。此类夹具是以电动机作为动力源，通过减速器产生夹紧工件的夹紧力。此种夹具的传动部分常采用齿轮减速装置，结构比较复杂，夹紧动作比气动和液压夹紧缓慢。

(5) 磁力夹具。此类夹具是以电磁铁或永久磁铁产生的磁力作为动力源直接夹紧工件，

一般多用于切削力较小的精加工，如车床和外圆、内圆磨床上的电磁夹具、平面磨床上的磁力工作台等。近年来已设计制造出强力磁盘，将逐步推广应用于切削力较大的加工中去。

(6) 真空夹具。此类夹具是利用真空泵或以压缩空气为动力源的抽气筒，使夹具的内腔产生真空，依靠四周大气的压力将工件压紧。这类夹具的夹紧力较小，故一般仅适用于精加工本身刚度很低的工件，如磨削加工不导磁的薄性工件等。

(7) 切削力、离心力夹具。切削力、离心力夹具是一种不用专门动力装置的机动夹紧夹具。这类夹具，通常是利用机床的压锭过程或切削加工过程中产生的离心力或切削力夹紧工件的。

由于使用夹具的各种机床，其工作特点和结构形式的不同，对夹具的结构相应地提出了不同的要求。因此也可按所适用的机床把夹具分为车床夹具、铣床夹具、钻床夹具、镗床夹具和其他机床夹具等类型。

在学习中一般多按夹具的使用范围和适用机床进行分类，这种分类方法如图 7.2 所示。

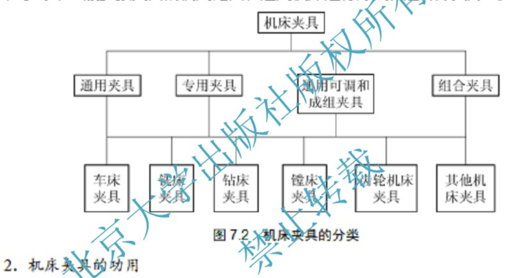


图 7.2 机床夹具的分类

2. 机床夹具的功用

夹具是机械加工中的一种工艺装备，它在生产中起的作用很大，所以在机械加工中的应用十分广泛。归纳起来有以下几方面的作用。

(1) 易于保证加工精度，并使一批工件的加工精度稳定。

(2) 缩短辅助时间，提高劳动生产率，降低生产成本。

(3) 减轻工人劳动强度、改善工人劳动条件，保证生产安全，降低对工人的技术要求。

(4) 扩大机床的工艺范围，实现一机多用。

(5) 减少生产准备时间，缩短新产品试制周期。

7.2 工件在夹具中的定位

工件定位，是指保证同一批工件在夹具中占有一致的正确的加工位置。包括工件在夹具中的定位、夹具在机床上的安装以及夹具对刀具和整个工艺系统的调整等工作过程。

由于定位基准和定位元件存在制造误差，故同批工件在夹具中所占据的位置不可能是一致的，这种位置的变化将导致加工尺寸产生误差(泛指距离尺寸误差和形位误差等)。但是，只要工件在夹具中位置的变化所引起加工尺寸的差异，没有超出本工序所规定的允许

范围，则仍认为工件在夹具中已被确定的位置是正确的。

由此可知，定位方案是否合理，将直接影响加工质量，同时，它还是夹具上其他装置的设计依据。所以正确解决工件的定位问题是很重要的，它包括下列三项基本任务。

(1) 从理论上进行分析，如何使同一批工件在夹具中占据一致的正确的位置。

(2) 选择或设计合理的定位方法及相应的定位装置。

(3) 保证有足够的定位精度。即工件在夹具中定位时虽有一定误差，但仍能保证工件的加工要求。

7.2.1 工件定位原理

1. 六点定位原理

一个物体在空间不受约束时，可以向任意方向移动和绕任意轴转动，可以把它的运动分解为沿3个坐标轴的移动(分别用$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$表示)和绕3个坐标轴的转动(分别用$\overset{\frown}{X}$、$\overset{\frown}{Y}$、$\overset{\frown}{Z}$表示)，称物体在空间具有6个自由度(如图7.3所示)，如果完全限制了物体的这6个自由度，则物体在空间就有一个完全确定的位置。在XOY平面布置3个支承点，约束物体的$\vec{Z}$、$\overset{\frown}{X}$、$\overset{\frown}{Y}$，在XOZ平面布置两个支承点，约束物体的$\vec{Y}$、$\overset{\frown}{Z}$，在ZOY平面布置一个支承点，约束物体的$\vec{X}$，如图7.4(a)所示。

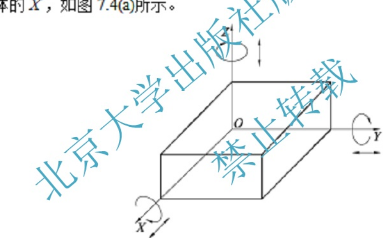
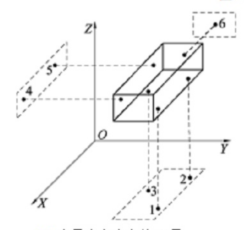
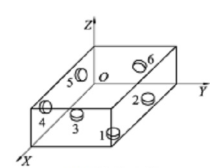


图7.3 物体的自由度



(a) 支承点六点定位原理



(b) 支承钉定位

图7.4 长方形工件的定位分析

1，2，3，4，5，6—支承点

用合理分布的 6 个支承点约束工件的 6 个自由度，使工件的位置完全确定，这称为六点定位原理。这里用的 6 个支承点必须与工件始终保持接触，脱离接触时就要失掉约束。

特别提示

工件的定位是通过定位元件来实现的，而不是几何上的点，一般来说，某个定位元件限制了工件的几个自由度相当于几个定位支承点，如图 7.4(b)所示。

2. 限制的工件自由度与加工要求的关系

根据工件在各工序的加工精度要求和选择定位元件的情况，工件的定位通常有如下几种情况。

1) 完全定位

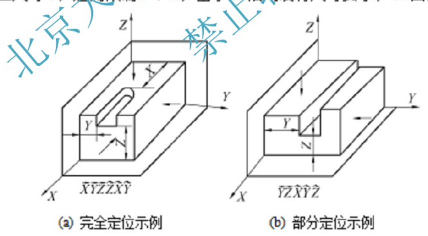
用 6 个支承点，限制工件的 6 个自由度，使工件的位置完全确定，称为工件的完全定位。

如图 7.5(a)所示，在工件上铣键槽时，为了保证加工尺寸 Z，需要限制 $\vec{Z}$、$\hat{X}$、$\hat{Y}$；为了保证加工尺寸 Y，还需限制 $\vec{Y}$、$\hat{Z}$；为了保证加工尺寸 X，最后还需限制自由度 $\vec{X}$。工件在夹具体上 6 个自由度完全限制。当工件在 X、Y、Z 这 3 个坐标方向上均有尺寸要求或位置精度要求时，一般采用这种定位方式。

2) 部分定位(不完全定位)

根据工件的加工要求，不需要限制的自由度没有安排定位元件去限制，称为部分定位或不完全定位。

如图 7.5(b)所示，在工件上铣通槽，为了保证加工尺寸 Z，需限制 $\vec{Z}$、$\hat{X}$、$\hat{Y}$自由度；为了保证加工尺寸 Y，还需限制 $\vec{Y}$、$\hat{Z}$，由于 X 轴向没有尺寸要求，$\vec{X}$自由度不必限制。



(a) 完全定位示例　　(b) 部分定位示例

图 7.5 工件应限制自由度的确定

3) 欠定位

根据工件的加工要求，需要限制的自由度没有安排定位元件去限制，称为欠定位。欠定位是不允许的。

如图 7.6 所示，若不设防转定位销 A，则工件 $\hat{X}$ 自由度不能得到限制，工件绕 X 回转方向的位置是不确定的，无法保证铣出的上方键槽与下方键槽的位置要求。

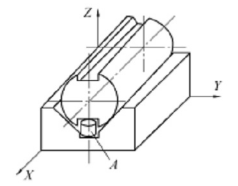


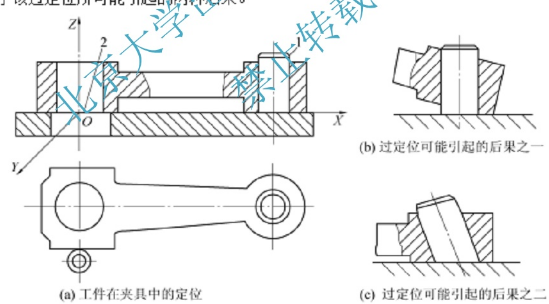
图 7.6　用防转销消除欠定位

A—防转定位销

4) 过定位(重复定位)

某一个自由度有两个或两个以上的定位元件对其限制，称为过定位。一般情况下，过定位也是不允许的。

图 7.7(a)所示为连杆加工大头孔时工件在夹具中定位的情况，连杆的定位基准为端面、小头孔及一侧面，夹具上的定位元件为支承板、长销及挡销。支承板与连杆端面接触相当于 3 点定位，限制 $\vec{Z}$、$\hat{X}$、$\hat{Y}$自由度；长销与连杆小头孔配合相当于 4 点定位，限制 $\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\hat{X}$、$\hat{Y}$这 4 个自由度；挡销与连杆侧面接触，限制$\hat{Z}$。这样，3 个定位元件相当于 8 个定位支承点，共限制了 6 个自由度，其中，$\hat{X}$及$\hat{Y}$被重复限制，属于重复定位。图 7.7(b)和(c)表示了该过定位所可能引起的两种后果。



(a) 工件在夹具中的定位　　(b) 过定位可能引起的后果之一　　(c) 过定位可能引起的后果之二

图 7.7　连杆大头孔加工时定位分析

1—长圆柱销　2—支承板

过定位造成的后果：(1)使工件或夹具元件变形，引起加工误差；(2)使部分工件不能装夹，产生定位干涉(如一面两销)，过定位一般是不允许的，但在精加工时也可看到。

消除过定位及其干涉的途径：(1)改变定位元件结构，消除对自由度的重复限制，如长销改成短销；(2)提高工件定位基面之间的位置精度，提高夹具定位元件之间的位置精度，减少或消除过定位引起的干涉，精加工时可增加刚度和定位稳定性。

特别提示

从上述关于定位问题的分析可以知道，在讨论工件定位的合理性问题时，主要应研究下面的 3 个问题。

(1) 研究满足工件加工面位置度要求所必须限制的自由度。

(2) 从承受切削力、设置夹紧机构以及提高生产率的角度分析在不完全定位中还应限制哪些自由度。

(3) 在定位方案中，是否有欠定位和过定位现象，能否允许过定位的存在。

7.2.2 定位元件的选择与设计

1. 定位副的选择和要求

工件定位时，代表工件在夹具中所占据位置的点、线、面称为定位基准。但是工件的定位是通过一定的表面和定位元件相接触或配合而实现的，这些表面(定位基面)和定位元件合称为定位副。定位副的选择及其制造精度将直接影响工件的定位精度和夹具的工作效率以及制造、使用等性能，故对定位副的选择需提出必要的原则和要求。

1) 定位基准的选择

工件的定位是通过定位基面进行的，因此这些基面的几何形状、尺寸及表面状况在很大程度上决定着定位方法及所用定位元件的选择，故从夹具设计角度出发提出如下选择原则。

(1) 尽量使工件的定位基准与工序基准重合，以避免产生基准不符误差。但当两基准重合后，会使夹具结构复杂或工件定位不稳定时，则应另选定位基准，此时必须计算和控制基准不符误差。

(2) 尽量用精基准作为定位基准，以保证有足够的定位精度。

(3) 应使工件装夹稳定，使在加工过程中因切削力或夹紧力而引起的变形最小。

(4) 遵守基准统一原则，以减少设计和制造夹具的时间和费用。但如果因此而造成夹具结构复杂时，则不必强求定位基准统一。

(5) 应使工件定位方便、夹紧可靠、便于操作，夹具结构简单。

2) 对定位元件的基本要求

(1) 足够的精度。

(2) 耐磨性好。

(3) 足够的强度和刚度。

(4) 工艺性好，便于制造、装配和维修。

(5) 便于清理切屑。

定位方法和定位元件的选择包括定位元件的结构、形状、尺寸及布置形式等，主要决定于工件的加工要求、工件定位基准和外力的作用状况等因素。下面主要按不同的定位基准面分别介绍所用定位元件的结构形式。

2. 平面定位元件

除圆柱回转体零件外，最常用的定位基准包括箱体、机座、支架、杠杆、圆盘、板状类零件等。平面定位的主要形式是支承定位。夹具上常用的支承元件，根据是否起限制自

由度作用，能否调整等情况分为以下几种。

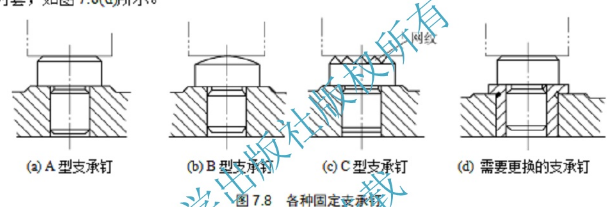
1) 固定支承

定位元件装在夹具上后，一般不再拆卸或调节，主要有支承钉与支承板两种。

支承钉一般用于工件的 3 点支承或侧面支承。其结构有 A 型(平头)、B 型(球头)、C 型(网纹或齿纹)3 种。它们的结构和尺寸均已经标准化。如图 7.8(a)、(b)、(c)所示。

A 型支承钉与工件接触面大，常用于定位平面较为光滑的工件，即适用于精基准。B 型、C 型支承钉与工件接触面小，适用于粗基准平面定位。C 型支承钉的突出优点是定位面间摩擦力大，可阻碍工件移动，加强定位稳定性。但网纹中容易积屑，一般常用于粗糙表面的侧面定位。

固定支承钉一般与夹具体采用过盈配合。磨损后，较难更换，若需要更换支承钉应加衬套，如图 7.8(d)所示。

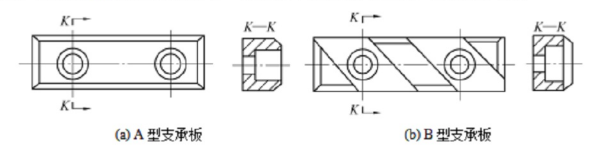


(a) A 型支承钉　(b) B 型支承钉　(c) C 型支承钉　(d) 需要更换的支承钉

图 7.8　各种固定支承钉

当支承平面较大，而且是精基准平面时，往往采用支承板定位，增加工件刚性及稳定性。

图 7.9 所示为支承板的类型。图 7.9(a)为 A 型(光面)，图 7.9(b)为 B 型(凹槽)。A 型结构简单，但沉头螺钉清理切屑较困难，一般用于侧面支承。B 型支承板开了斜凹槽，排屑容易，可防止切屑留在定位面上，一般作水平面支承，用螺钉与夹具体固定。



(a) A 型支承板　(b) B 型支承板

图 7.9　固定支承板的类型

2) 可调支承

在夹具体上，支承点的位置可调节的定位元件称为可调支承。图 7.10 所示即为常用的两种可调支承。其中，图 7.10(a)是直接用手或扳杆拧动球头螺钉进行调节，一般适用于重量轻的小型工件；图 7.10(b)则是通过扳手进行调节，故适用于较重的工件。可调支承的支承点位置，一经调节适当后，便需通过锁紧螺母锁紧，以防止在夹具使用过程中定位支承螺钉的松动而使其支承点位置发生变化。

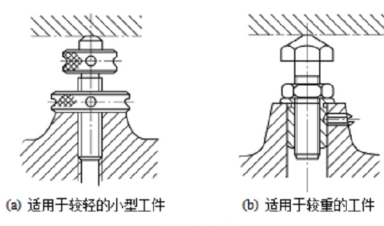


图 7.10　可调支承

可调支承多用于毛坯面定位，每批调整一次，以补偿各批毛坯误差。

3) 自位支承(浮动支承)

支承本身可随工件定位基准面的变化而自动适应，又称为浮动支承。一般只限制一个自由度，即一点定位。

图 7.11(a)、(b)是两点式自位支承，图 7.11(c)是三点式自位支承。这类支承的工作特点是：支承点的位置能随着工件定位基面的位置不同而自动调节，定位基面压下其中一点，其余点便上升，直至各点都与工件接触。由于接触点数的增加，提高了工件的装夹刚度和稳定性，但其作用仍相当于一个固定支承，只限制工件一个自由度。

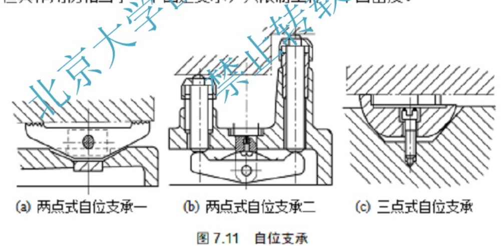


图 7.11　自位支承

4) 辅助支承

在工件定位后才参与支承的元件，不起限制自由度作用，主要用于提高工件的刚度和定位稳定性。

如图 7.12 所示，工件以内孔及端面定位，钻右端小孔。若右端不设支承，工件装夹好后，右边为一悬臂，刚性差。若在 A 处设置固定支承，属不可用重复定位，有可能破坏左端的定位。在这种情况下，宜在右端设置辅助支承。工件定位时，辅助支承是浮动的(或可调的)，待工件夹紧后再固定下来，以承受切削力。

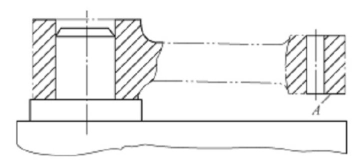


图 7.12　辅助支承的应用

(1) 螺旋式辅助支承。如图 7.13(a)所示，螺旋式辅助支承的结构与可调支承相近，但操作过程不同，前者不起定位作用，后者起定位作用，且结构上螺旋式辅助支承不用螺母锁紧。

(2) 自动调节支承(GB/T 2238—1991)。如图 7.13(b)所示，弹簧 1 推动滑柱 2 与工件接触，转动手柄通过顶柱 3 锁紧滑柱 2，使其承受切削力等外力。此结构的弹簧力应能推动滑柱，但不能顶起工件，不会破坏工件的定位。

(3) 推引式辅助支承。如图 7.13(c)所示，工件定位后，推动手轮 4 使滑销 6 与工件接触，然后转动手轮使斜楔 5 开槽部分胀开而锁紧。

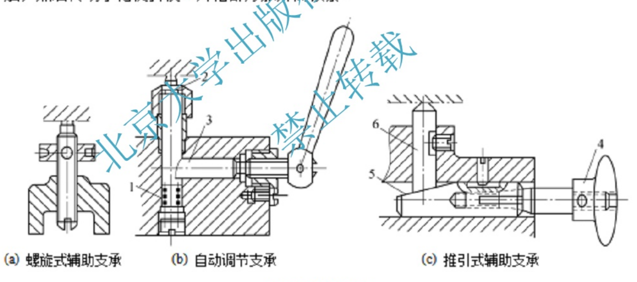


图 7.13 辅助支承

1—弹簧　2—滑柱　3—顶柱　4—手轮　5—斜楔　6—滑销

3. 工件以圆柱孔定位

1) 定位销

在夹具中，工件以圆孔表面定位时使用的定位销一般有固定式和可换式两种。在大批大量生产中，由于定位销磨损较快，为保证工序加工精度需定期维修更换，此时常用便于更换的可换式定位销。图 7.14(a)所示为固定式定位销，图 7.14(b)所示为可换式定位销。图中 A 型为圆柱销，B 型为菱形销。

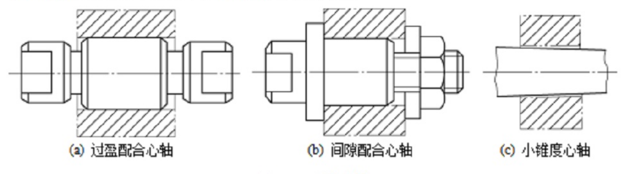
(a) 固定式定位销　　(b) 可换式定位销

图 7.14　定位销

2) 心轴

主要用于盘套类零件的定位。工件在心轴上的定位通常限制了工件除绕自身轴线转动和沿自身轴线移动以外的 4 个自由度，是 4 点定位。

心轴形式很多，图 7.15 所示为几种常见的刚性心轴。其中图 7.15(a)为过盈配合心轴，图 7.15(b)为间隙配合心轴，图 7.15(c)为小锥度心轴。



(a) 过盈配合心轴　　(b) 间隙配合心轴　　(c) 小锥度心轴

图 7.15　刚性心轴

小锥度心轴的锥度为 1∶5000~1∶1000。工件安装时轻轻敲入或压入，通过孔和心轴接触表面的弹性变形来夹紧工件。使用小锥度心轴定位可获得较高的定位精度。

除了刚性心轴外，在生产中还经常采用弹性心轴、液塑心轴、自动定心心轴等。这些心轴在对工件定位的同时也将工件夹紧，使用方便。

4．工件以外圆表面定位

工件以外圆表面定位时，最常用的定位元件有定位套、半圆套和 V 形块等。定位套和半圆套对工件外圆表面主要实现定心定位，V 形块则实现对外圆表面的定心对中定位。

1) 定位套

图 7.16 为常用的几种定位套。其内孔轴线是限位基准，内孔面是限位基面。为了限制工件沿轴向的自由度，常与端面联合定位。用端面作为主要限位面时，应控制套的长度，以免夹紧时工件产生不允许的变形。定位套结构简单、容易制造，但定心精度不高，故只适用于精定位基面。

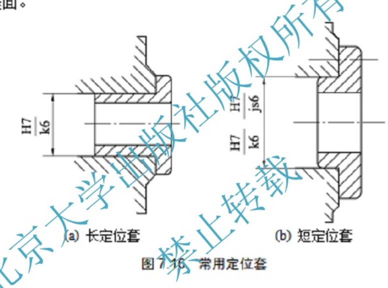


图 7.16　常用定位套

2) 半圆套

半圆套常用于大型轴类工件及不便于轴向装夹的零件的定位。图 7.17 中，下面的半圆套是定位元件，上面的半圆套起夹紧作用。

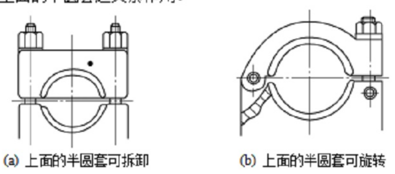
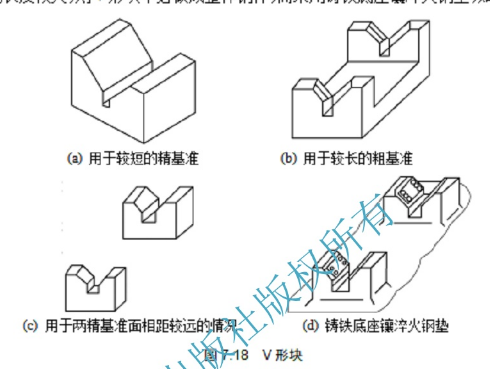


图 7.17　半圆套定位装置

3) V形块

不论定位基面是否经过加工，不论是完整的圆柱面还是局部圆弧面都可以采用 V 形块定位。其优点是对中性好，既能使工件的定位基准轴线对中在 V 形块两斜面的对称平面上，而不受定位基面直径误差的影响，又安装方便。V 形块结构尺寸已标准化，斜面夹角有 60°、90° 和 120° 。

图 7.18 所示为常用的 V 形块结构。图 7.18(a)用于较短的精基准定位；图 7.18(b)用于较长的粗基准(或阶梯轴)定位；图 7.18(c)用于两段精基准面相距较远的场合。如果定位元件直径与长度较大，则 V 形块不必做成整体钢件，而采用铸铁底座镶淬火钢垫，如图 7.18(d)。



(a) 用于较短的精基准　(b) 用于较长的粗基准

(c) 用于两精基准面相距较远的情况　(d) 铸铁底座镶淬火钢垫

图 7.18　V 形块

5. 工件以其他表面定位

工件除了以平面、圆柱孔和外圆表面定位外，有时也以其他形式表面定位。图 7.19 为工件以锥孔定位的例子，锥度心轴限制了工件除绕自身轴线转动之外的 5 个自由度。

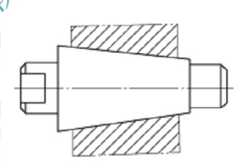


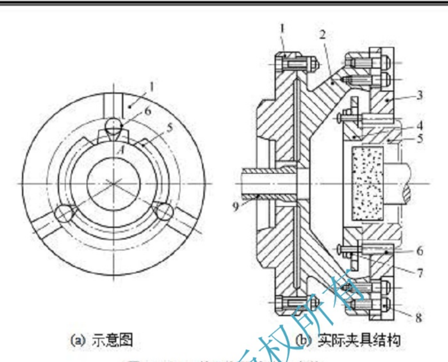
图 7.19　工件在锥度心轴上定位

图 7.20 为工件(齿轮)以渐开线齿面定位的例子。图 7.20(a)为示意图，显示了 3 个定位圆柱均布(或近似均布)插入齿间，实现分度圆定位。图 7.20(b)所示为实际夹具结构，该夹具广泛应用于齿轮热处理后的磨孔工序中，可保证齿轮孔与齿面之间的同轴度。

6. 组合表面定位

实际生产中经常遇到的不是单一表面定位，而是几个定位表面的组合。其中常见的方式有：一个平面和与其垂直的两个孔组合(一面两孔定位)；一孔及其垂直端面定位；一外圆表面及其端面定位；两个或 3 个相互垂直平面定位；一外圆表面与一圆孔定位；两个外圆表面定位等等。采用组合定位时，必须注意解决两个主要问题，一是正确处理重复定位；二是控制各定位副产生的多项定位误差的综合影响，并使其最小。

一面两孔定位是箱体、盖板及杠杆等类零件经常采用的组合定位方式，此处着重对其进行讲解。



(a) 示意图　(b) 实际夹具结构

图7.20　工件以渐开线齿面定位

1—夹具体　2—弹性薄膜盘　3—卡爪　4—保持架　5—工件(齿轮)
6—定心圆柱　7—弹簧　8—螺钉　9—推杆

实例分析 7-1

如图7.21所示，零件采用一面两孔定位，夹具上相应的定位元件是一面两销。为了解决好采用销定位时应注意的两个主要问题，两定位销中的一个应采用削边销。削边销的宽度可以通过简单的几何关系求出。如图7.22所示，考虑一批工件定位时最不利的极端情况：两孔中心距为最大$\left(L+\frac{1}{2}\delta_{L_D}\right)$，两销中心距为最小$\left(L-\frac{1}{2}\delta_{L_d}\right)$，两孔直径均为最小，分别为$D_1$和$D_2$，两销直径均为最大(分别为$d_1=D_1-\varepsilon_1$和$d_2=D_2-\varepsilon_2$)。其中$\delta_{L_D}$和$\delta_{L_d}$分别为两孔中心距和两销中心距的公差，$\varepsilon_1$和$\varepsilon_2$分别为孔1与销1、孔2与销2之间的最小配合间隙。由图7.22可知：在$\triangle AO_2C$和$\triangle BO_2C$中

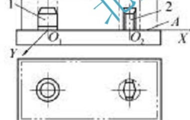


图7.21　一面两孔定位

$$O_2C^2=O_2A^2-AC^2=O_2B^2-BC^2$$

式中　$O_2A=\frac{D_2}{2}$

$$O_2B=\frac{d_2}{2}=\frac{D_2-\varepsilon_2}{2}$$

$$AC=AB+BC=\frac{1}{2}(\delta_{L_D}+\delta_{L_d})+\frac{b}{2}$$

代入上式得：

$$\left(\frac{D_2}{2}\right)^2-\left[\frac{1}{2}(\delta_{L_D}+\delta_{L_d})+\frac{b}{2}\right]^2=\left(\frac{D_2-\varepsilon_2}{2}\right)^2-\left(\frac{b}{2}\right)^2$$

化简并略去二次微量$(\delta_{L_D}+\delta_{L_d})^2$和$\varepsilon_2^2$得

$$b=\frac{D_2\varepsilon_2}{\delta_{L_D}+\delta_{L_d}} \tag{7-1}$$

实际生产中，削边销的尺寸已标准化，选用时可查表。

采用一面两孔定位时，定位装置的设计通常按下面步骤进行。

图7.22 采用削边销的原因及削边销宽度计算

(1) 确定两定位销中心距及公差。夹具上两销中心距的基本尺寸取工件两孔中心距的基本尺寸，其公差取工件两孔中心距公差的1/5～1/2，即令：δ_{L_d}=(1/5～1/2) δ_{L_D}。

(2) 确定圆柱销直径及其公差。圆柱销的基本尺寸取相应工件孔的最小直径，其公差一般取g6或f7。

(3) 确定削边销宽度，直径及其公差。首先按有关标准选取削边销的宽度b；然后按式(7-1)计算出削边销与其配合孔的最小间隙；再计算削边销直径的基本尺寸；最后按h6或h7选取削边销的公差。

7.2.3 提高工件在夹具中定位精度的主要措施

一批工件在夹具中定位，由于定位不准产生的定位误差主要是由基准位移误差和基准不重合误差两部分组成，故提高定为基准精度的主要措施也就在于消除或减少这两方面的误差。

1. 消除或减少基准位移误差的措施

1) 选用基准位移误差小的定位元件

对以平面为主要定位基准的工件，若以未加工的毛坯表面定位，往往由于一批工件定位表面状况的不同，当采用3个球头支承钉定位时会产生较大的基准位移误差。若将3个球头支承钉改为3个多点自位支承，由于自位支承上的两个或3个支撑点与工件接触时仅

反映这几个接触点处毛坯表面的平均状况，故可减少此毛坯表面的位移误差。

2) 合理布置定位元件在夹具中的位置

对以平面组合定位的工件，若定为基准面系未加工的毛坯表面，为提高一批工件的定位精度，应尽量将与第一定位基准接触的 3 个支承钉以及与第二定位基准接触的两个支承钉之间的距离拉开。这样不仅可增加工件定位的稳定性，还可减少定位基准的位置误差。同理，对一面两孔组合定位，平面、外圆与内孔组合定位，以及外圆与外圆组合定位等，也可通过尽可能增大有关定位元件之间的距离来减小工件定位基准的位移误差。

3) 提高工件定位表面与定位元件的配合精度

对以内孔和外圆等为定位基准的工件，在定位时尽可能提高它们与定位心轴、定位销或各种定位套的配合精度，从而由于减小了配合间隙而减少了被定位工件定位表面的位移误差。

4) 正确选取工件上的第一、第二和第三定位基准

通过各种类型的表面组合定位的分析可知，第一定位基准的误差最小，第二和第三定位基准的位置误差则较大。为此，在设计夹具选取定位基准时，应以直接与工件加工精度有关的基准为第一定位基准。

2. 消除或减少基准不重合误差的措施

在夹具设计时，为消除或减少基准不重合误差，应尽可能选择该工序的工序基准为定位基准。当一个工件在一道工序的加工中，对加工表面有几项加工精度要求时，则应根据各项加工精度要求的高低相应选取工件定位时的第一、第二和第三定位基准。

7.3 工件的夹紧

夹紧装置的基本任务就是保持工件在定位中所获得的既定位置，以便在切削力、重力、惯性力等外力作用下，不发生移动和振动，确保加工质量和生产安全。有时工件的定位是在夹紧过程中实现的，正确的夹紧还能纠正工件定位不正确的问题。

7.3.1 夹紧装置的组成及其设计要求

1. 夹紧装置的组成

一般夹紧装置由下面两个基本部分组成。

1) 动力源

动力源就是产生原始作用力的部分，可分为手动夹紧和机动夹紧两大类。

2) 夹紧机构

夹紧机构接受和传递原始作用力，使之变成夹紧力，并执行夹紧任务。它包括中间递力机构和夹紧元件。中间递力机构把来自人力或动力装置的力传递给夹紧元件，再由夹紧元件直接与工件接触，最终完成夹紧任务。

根据动力源的不同和工件夹紧的实际需要，一般中间递力机构在传递夹紧力的过程中，还可以起到以下作用：①改变作用力的方向；②改变作用力的大小；③具有一定的自锁性能，该作用在手动夹紧时尤为重要。

夹紧装置的组成可以用图 7.23 方框图表示。

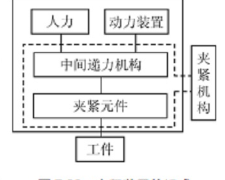


图 7.23　夹紧装置的组成

2. 夹紧装置的设计要求

夹紧装置的设计和选用是否正确合理，对于保证加工质量、提高生产率、减轻工人劳动强度有很大影响。为此，对夹紧装置提出如下基本要求。

(1) 夹紧力应有助于定位，而不应破坏定位。

(2) 夹紧力的大小适当。夹紧力应能保证加工过程中工件不发生移动和振动，并能在一定范围内调节；同时又要避免工件产生不适当的变形和表面损伤。

(3) 应有足够的夹紧行程，手动时要有一定的自锁作用。

(4) 夹紧装置的复杂程度和自动化程度应与生产批量和生产方式相适应，同时要结构紧凑、动作灵活，制造、操作、维护方便，省力、安全，并有足够的强度和刚度。

为满足上述要求，其核心问题是正确地确定夹紧力。

7.3.2　夹紧力的确定

夹紧力包括大小、方向和作用点 3 个要素，它们的确定是夹紧机构设计中首先要解决的问题。

1. 夹紧力方向的选择

夹紧力方向的选择一般应遵循以下原则。

(1) 夹紧力的作用方向应有利于工件的准确定位，而不能破坏定位。主要夹紧力方向应垂直于主要定位面。

如图 7.24 所示，在直角支座零件上镗孔，要求保证孔与端面的垂直度，则应以端面 A 作为第一定位基准面，此时夹紧力作用方向应如图中 F_{j1} 所示。若要求保证孔的轴线与支座底面平行，则应以底面 B 作为第一定位基准面，此时夹紧力作用方向应如图中 F_{j2} 所示。否则，由于 A 面与 B 面的垂直度误差，将会引起孔轴线相对于 A 面(或 B 面)的位置误差。实际上，在这种情况下，由于夹紧力作用方向不当，将会使工件的主要定位基准面发生转换，从而产生定位误差。

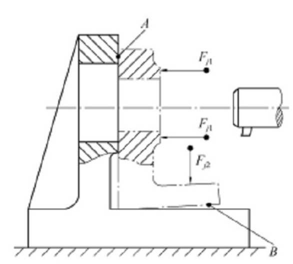
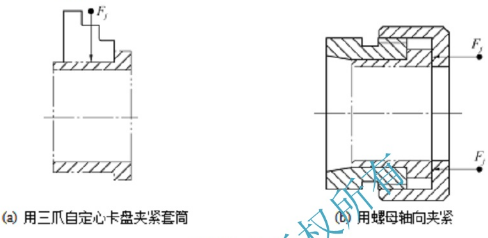


图 7.24　夹紧力作用方向的选择

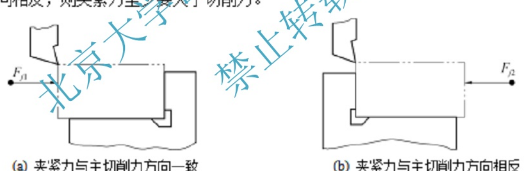
(2) 夹紧力的作用方向应尽量与工件刚度最大的方向相一致，以减小工件变形。即夹紧力的作用方向应使工件变形尽可能小。图 7.25 所示的薄壁套筒零件，它的轴向刚度比径向刚度大。若如图 7.25(a)所示，用三爪自定心卡盘夹紧套筒，将会使工件产生很大变形。若改变成图 7.25(b)的形式，用螺母轴向夹紧工件，则不易产生变形。



(a) 用三爪自定心卡盘夹紧套筒　　(b) 用螺母轴向夹紧

图 7.25 薄壁套筒夹紧

(3) 夹紧力的作用方向应尽可能与切削力、工件重力方向一致，以减小所需夹紧力。夹紧力的作用方向应使所需夹紧力最小。如图 7.26(a)所示，夹紧力 F_{j1} 与主切削力方向一致，切削力由夹具固定支承承受，此时所需夹紧力较小。如图 7.26(b)所示，夹紧力 F_{j2} 与主切削力方向相反，则夹紧力至少要大于切削力。



(a) 夹紧力与主切削力方向一致　　(b) 夹紧力与主切削力方向相反

图 7.26 夹紧力与切削力方向

2. 夹紧力作用点的选择

夹紧力作用点的选择是指在夹紧力作用方向已确定的情况下，确定夹紧元件与工件接触点的位置和接触点的数目。选择夹紧力作用点时一般应注意以下几点。

(1) 夹紧力作用点应正对支承元件或位于支承元件所形成的支承面内，以保证工件已获得的定位不变。如图 7.27 所示，由于夹紧力作用点不正对支承元件，产生了使工件翻转的力矩，有可能破坏工件的定位。夹紧力的正确位置应如图 7.27 中虚线箭头所示。

(2) 夹紧力作用点应处在工件刚性较好的部位，以减小工件的夹紧变形。如图 7.28(a)所示，夹紧力作用点在工件刚性较差的部位，易使工件产生变形。如改为图 7.28(b)所示情况，不但作用点处工件刚性较好，而且夹紧力均匀分布在环形接触面上，可使工件整体和局部变形都很小。对于薄壁零件，增加均布作用点的数目，常常是减小工件夹紧变形的有效方法。

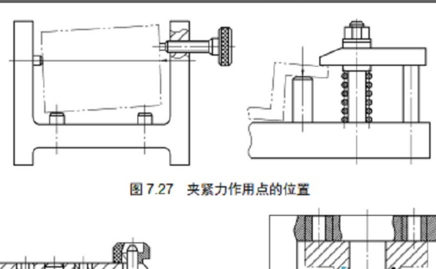
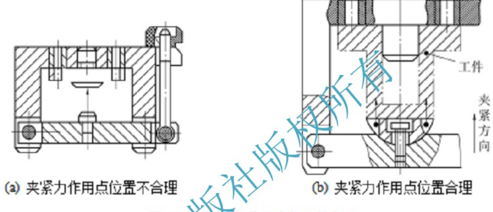


图 7.27　夹紧力作用点的位置



(a) 夹紧力作用点位置不合理　　(b) 夹紧力作用点位置合理

图 7.28　夹紧力作用点与工件变形

(3) 夹紧力 F_j 作用点应尽可能靠近被加工表面，以便减小切削力对工件造成的翻转力矩。必要时应在工件刚度差的部位增加辅助支承并施加夹紧力，以减小切削过程中的振动和变形。如图 7.29 所示零件加工部位刚度较差，在靠近切削部位增加辅助支承并施加夹紧力 F_j'，可有效防止切削过程中的振动和变形。

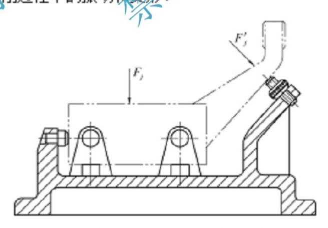
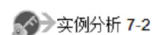


图 7.29　夹紧力作用点靠近加工面

3．夹紧力大小的估算

为了在切削过程中有效地夹紧工件，所需夹紧力的大小与工件所承受的切削力密切相关。要准确计算切削力的大小十分困难，因此在设计夹紧装置时，常采用下述两种方法来确定所需的夹紧力：一种是根据同类夹具的使用情况，用类比法进行估算，这种方法在生产中应用非常广泛；另一种是根据加工情况，确定出工件在加工过程中对夹紧最不利的瞬时状态，再将此时工件所受的各种外力看作静力，并用静力平衡原理，计算出所需夹紧力。

由于所加工的工件的状态各异，切削工具不断地磨损等因素的影响，所计算出的夹紧力与实际所需的夹紧力间仍然存在着较大的差异。为确保夹紧安全可靠，往往将计算所得的夹紧力扩大 K 倍作为实际需要的夹紧力，K 称为安全系数。一般精加工 K=1.5~2，粗加工或当夹紧力与切削力方向相反时 K=2.5~3。



实例分析 7-2

如图 7.30 所示，铣刀的铣削力 F_a 将使工件绕 O 转动，转动力矩 F_aL 的大小随铣刀切削刃从切入至切出瞬间位置变化而变化。与该力矩相平衡的是作用在 A、B 点上的夹紧力的反力所构成的摩擦力矩。根据力矩平衡条件有：

$$\frac{1}{2}F_{j\min}\mu(L_1+L_2)=F_aL$$

由此可求出最小夹紧力：

$$F_{j\min}=\frac{2F_aL}{\mu(L_1+L_2)}$$

考虑安全系数，有

$$F_j=\frac{2KF_aL}{\mu(L_1+L_2)}$$

由于此处夹紧力与切削力方向相反，取 K=3，则

$$F_j=\frac{6F_aL}{\mu(L_1+L_2)}$$

式中　F_j——所需夹紧力，N；

μ——夹具支承面与工件之间的摩擦因数。

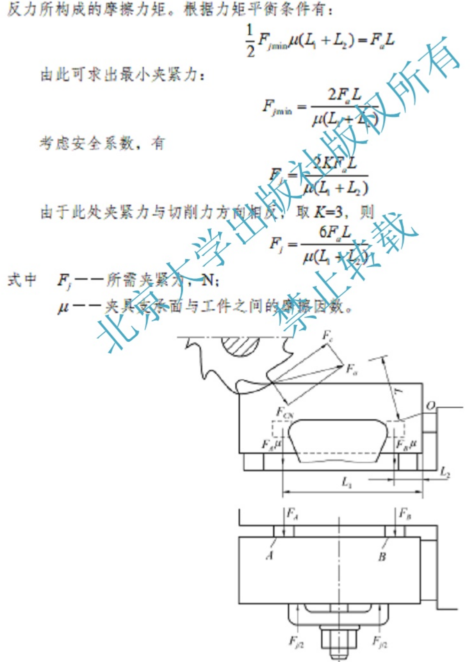
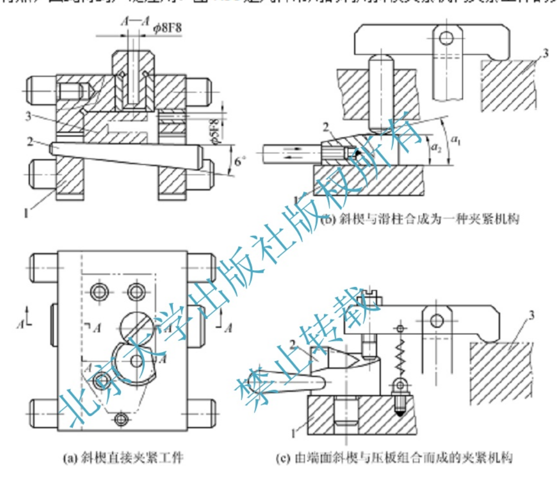


图 7.30　铣削加工夹紧力计算

7.3.3　常用夹紧机构

1. 斜楔夹紧机构

斜楔夹紧机构是夹紧机构中最基本的形式之一，螺旋夹紧机构、偏心夹紧机构及定心对中夹紧机构等都是斜楔夹紧机构的变形。斜楔夹紧具有结构简单，增力比大，自锁性能好等特点，因此得到广泛应用。图7.31是几种常用的利用斜楔夹紧机构夹紧工件的实例。



(a) 斜楔直接夹紧工件　(b) 斜楔与滑柱合成为一种夹紧机构　(c) 由端面斜楔与压板组合而成的夹紧机构

图7.31　几种常用斜楔夹紧机构

1—夹具体　2—斜楔　3—工件

图7.31(a)是在工件上钻互相垂直的ϕ8mm、ϕ5mm两组孔。工件装入后，锤击斜楔大头，夹紧工件。加工完毕后，锤击斜楔小头，松开工件。由于用斜楔直接夹紧工件的夹紧力较小，且操作费时，所以实际生产中应用不多，多数情况下是将斜楔与其他机构联合起来使用。图7.31(b)是将斜楔与滑柱合成为一种夹紧机构，既可以手动，也可以气压驱动。图7.31(c)是由端面斜楔与压板组合而成的夹紧机构。

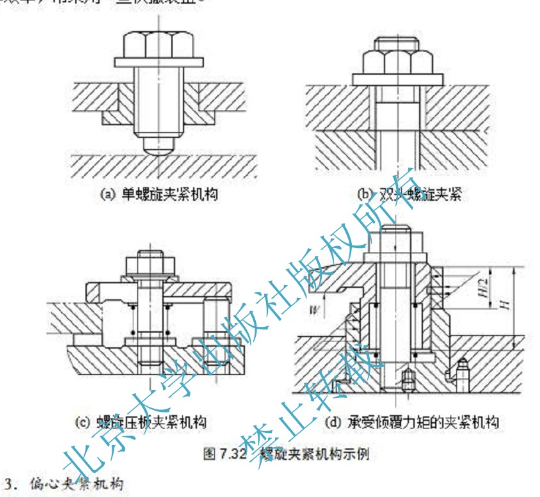
2. 螺旋夹紧机构

螺旋夹紧机构结构简单，易于操作，增力比大，自锁性能好，是手动夹紧中应用最广泛的一种夹紧机构。

螺旋夹紧机构中所用的螺旋，实际上相当于把斜楔绕在圆柱体上，因此它的夹紧作用原理与斜楔是一样的。不过这里是通过转动螺旋，使绕在圆柱体上的斜楔高度发生变化来

夹紧工件的。图7.32是几种简单的螺旋夹紧机构。

由于螺旋夹紧机构具有结构简单、制造容易、夹紧可靠、增力比大、夹紧行程不受限制等特点，所以在手动夹紧装置中被广泛使用。螺旋夹紧机构的缺点是动作慢。为提高其工作效率，常采用一些快撤装置。



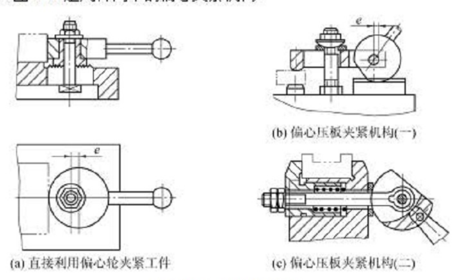
(a) 单螺旋夹紧机构　(b) 双头螺旋夹紧

(c) 螺旋压板夹紧机构　(d) 承受倾覆力矩的夹紧机构

图7.32　螺旋夹紧机构示例

3. 偏心夹紧机构

偏心夹紧机构是一种快速动作的夹紧机构，它的工作效率较高，在夹具设计中应用得也比较广泛。图7.33是几种简单的偏心夹紧机构。



(a) 直接利用偏心轮夹紧工件　(b) 偏心压板夹紧机构(一)　(c) 偏心压板夹紧机构(二)

图7.33　偏心夹紧机构

常用的偏心轮有两种形式，即：圆偏心和曲线偏心。曲线偏心采用阿基米得螺旋线或对数螺旋线作为轮廓曲线。曲线偏心虽有升角变化均匀等优点，但因制造复杂，故而用得较少；而圆偏心则因结构简单、制造容易，所以在生产中得到广泛应用。

偏心夹紧的优点是结构简单，操作方便，动作迅速，缺点是自锁性能较差，增力比较小。一般常用于切削平稳且切削力不大的场合。

4. 铰链夹紧机构

铰链夹紧机构是一种铰链和杠杆组合的夹紧机构，这种机构具有动作迅速、结构简单，扩力比较大，摩擦损失小，并易于改变力的作用方向的优点，因此应用也很广泛。但是它的自锁性很差，一般不单独使用，多用于机动夹紧机构中与气动、液压等夹具联合使用，可以缩小气缸直径，减少所需动力，故这种机构又称扩力机构。

铰链夹紧机构适用于多点、多件夹紧，在气动夹紧中广泛应用。

5. 定心、对中夹紧机构

在机械加工中常遇到以轴线或对称中心为设计基准的工件，为了使定位基准与设计基准重合，就必须采用定心、对中夹紧机构。所谓“定心”就是夹紧工件时，工件的对称中心与夹具夹紧机构的中心重合。定心夹紧机构中与工件接触的元件既是定位元件又是夹紧元件，使工件的定位与夹紧过程同时完成。定心夹紧机构是一种同时实现对工件定心定位和夹紧的夹紧机构，即在夹紧过程中，能使工件相对于某一轴线或某一对称面保持对称性。

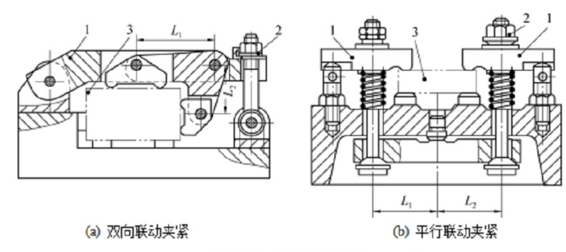
定心夹紧机构主要用于要求准确定心和对中的场合。此外，由于定位与夹紧动作同时进行，可以缩短辅助时间，提高劳动生产率，因此在生产中得到广泛应用。

定心、对中夹紧机构之所以能够实现准确定心、对中的原理，就在于它利用了定位夹紧元件的等速移动或均匀弹性变形的方式，来消除工件定位基准面的制造误差，使这些误差或偏差相当于所定心或对中的位置，能均匀对称地分配在工件的定位基面上。因此，定心、对中夹紧机构的种类虽多，但就其各自实现定心和对中的工作原理而言，可分为下述两大类：以等速移动原理工作的定心、对中夹紧机构；以均匀弹性变形原理工作的定心夹紧机构。

6. 联动夹紧机构

在夹紧机构设计中，有时需要对一个工件上的几个点或对多个工件同时进行夹紧。此时，为了减少工件装夹时间，简化结构，常常采用各种联动夹紧机构。这种机构要求从一处施力，可同时在几处(或几个方向上)对一个或几个工件同时进行夹紧。

图 7.34(a)所示的联动夹紧机构，夹紧力作用在两个相互垂直的方向上，称为双向联动夹紧；图 7.34(b)所示的联动夹紧机构，两个夹紧点的夹紧力方向相同，称为平行联动夹紧。以上两例中，两夹紧点上的夹紧力的大小可通过改变杠杆臂 L_1和 L_2 的长度来调整。



(a) 双向联动夹紧　　(b) 平行联动夹紧

图 7.34　联动夹紧机构

1—压板　2—螺母　3—工件

7.3.4　夹紧机构的动力装置

现代高效率的夹具，大多采用机动夹紧方式，如：气动、液压、电动等。其中以气动和液压装置应用最为普遍。

以上两种气缸的结构都已经标准化，可以查阅有关资料设计或选用。

1．气动夹紧装置

气动夹紧一般具有以下主要优点：夹紧力基本稳定；夹紧动作迅速；操作省力。

不足之处：空气是可以压缩的，因此夹紧刚度差，一般不适合切削力很大的场合；压缩空气的工作压力较小，所以对于同样的作用力来说，气动夹紧的气缸直径将比液压夹紧的油缸直径要大，因而结构较庞大；车间噪声大。

2．液压夹紧装置

液压夹紧装置利用压力油为夹紧动力。与气动夹紧装置相比，液压夹紧装置有以下优点：结构尺寸较小；工作平稳、可靠；噪声小。

但液动不如气动应用广泛，主要原因是采用液压夹紧装置需要设置专门液压系统，因此在没有液压系统的单台机床上不宜采用，它大多应用在本身已具有液压系统装置的机床设备上。

3．气、液增压夹紧装置

气、液增压夹紧装置以压缩空气为动力源，通过压力油来传力和增力。它集合了气动和液压传动两者的优点，可获得很大的传动力而结构尺寸又较小。

7.4　机床夹具的设计步骤和方法

7.4.1　机床夹具设计的一般步骤

本节主要介绍专用夹具的设计方法与步骤，并讨论与此有关的一些问题。

1．专用夹具设计的基本要求

机床专用夹具设计的基本要求可概括为以下几个方面。

(1) 保证工件的加工精度。这是夹具设计的最基本要求，其关键是正确地确定定位方案、夹紧方案、刀具导向方式及合理制定夹具的技术要求，必要时应进行误差分析与计算。

(2) 夹具总体方案应与生产纲领相适应。在大批量生产时应尽量采用快速、高效夹具结构，如多件夹紧、联动夹紧等，以缩短辅助时间；对于中、小批量生产，则要求在满足夹具功能的前提下，尽量使夹具结构简单、制造方便，以降低夹具制造成本。

(3) 操作方便，工作安全，能减轻工人劳动强度。

(4) 便于排屑。

(5) 有良好的结构工艺性。

2．专用夹具设计的一般步骤

1) 研究原始资料，明确设计要求

在接到夹具设计任务书后，首先要仔细地阅读被加工零件的零件图和装配图，清楚了解零件的作用、结构特点、所用材料及技术要求；其次要认真地研究零件的工艺规程，充分了解本工序的加工内容和加工要求；必要时还应了解同类零件加工所用过的夹具及其使用情况，作为设计时的参考。

2) 拟定夹具结构方案，绘制夹具结构草图

拟定夹具结构方案应主要考虑以下问题：根据零件加工工艺所给定的定位基准和六点定位原理，确定工件的定位方法并选择相应的定位元件；确定刀具引导方式，并设计引导装置或对刀装置，确定工件的夹紧方法，并设计夹紧机构；确定其他元件或装置的结构形式；考虑各种元件或装置的布局，确定夹具的总体结构。为使设计的夹具先进、合理，常需拟定几种结构方案，进行比较，从中择优。在构思夹具结构方案时，应绘制夹具结构草图，以帮助构思，并检查方案的合理性和可行性，同时也为进一步绘制夹具总图做好准备。

3) 绘制夹具总图，标注有关尺寸及技术要求

夹具总图应按国家标准绘制，比例尽量取 1:1，这样可使所绘制的夹具图有良好的直观性。对于很大的夹具，可使用 1:2 和 1:5 的比例，夹具很小时可使用 2:1 的比例。夹具总图在清楚表达夹具工作原理和结构的情况下，视图应尽可能少，主视图应取操作者实际工作位置。

绘制夹具总图可参照如下顺序进行：用假想线(双点画线)画出工件轮廓(注意将工件视为透明体，不挡夹具)，并应画出定位面、夹紧面和加工面；画出定位元件及刀具引导元件；按夹紧状态画出夹紧元件及夹紧机构(必要时用假想线画出夹紧元件的松开位置)；绘制夹具体和其他元件，将夹具各部分连成一体；标注必要的尺寸、配合、技术条件；对零件进行编号，填写零件明细表和标题栏。

4) 绘制零件图

对夹具总图中的非标准件均应绘制零件图，零件图视图的选择应尽可能与零件在总图上的工作位置相一致。

7.4.2　机床夹具设计举例

图 7.35 所示为一夹具设计过程。该夹具用于加工连杆零件的小头孔，图 7.35(a)为工序

简图。零件材料为 45 钢，毛坯为模锻件，年产量为 500 件，所用机床为立式钻床 Z525，设计的主要过程如下。

(1) 精度与批量分析。本工序有一定位置精度要求，属于中批生产，使用夹具加工是合适的。但考虑到生产批量不大，因而夹具结构应尽可能简单，以减少夹具制造成本。

(2) 确定夹具结构方案。

① 确定定位方案，选择定位元件。本工序加工要求保证的位置精度主要是中心距(120±0.05)mm 及平行度公差 0.05mm。根据基准重合原则，应选 ϕ36H7 孔为主要定位基准，即工序简图中规定的定位基准是恰当的。为使夹具结构简单，采用间隙配合的刚性心轴加小端面的定位方式(若端面 *B* 对孔 *A* 的垂直度误差较大，则端面处应加球面垫圈)。又为保证小头孔处壁厚均匀，采用活动 V 形块来确定工件的角向位置，如图 7.35(b)所示。

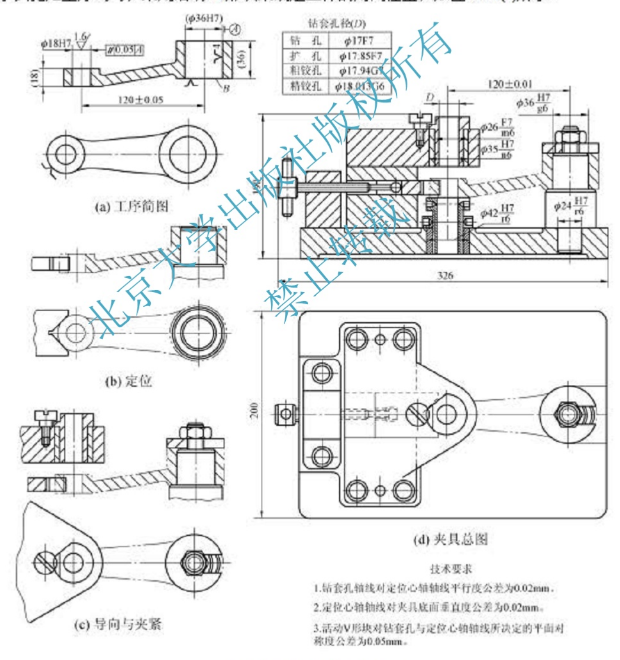


图 7.35　夹具设计过程示例

② 确定导向装置。本工序小头孔的精度要求较高，一次装夹要完成钻—扩—粗铰—精铰 4 个工步，故采用快换钻套(机床上相应的采用快换夹头)；又考虑到要求结构简单且能保证精度，故采用固定钻模板，如图 7.35(c)所示。

③ 确定夹紧机构。理想的夹紧方式应使夹紧力作用在主要定位面上，本例中可采用可涨心轴、液塑心轴等，但这样做会使夹具结构复杂，成本较高。为简化结构，确定采用螺纹夹紧，即在心轴上直接做出一段螺纹，并用螺母和开口垫圈锁紧，如图 7.35(c)所示。

④ 确定其他装置和夹具体。为了保证加工时工艺系统的刚度和减小工件变形，应在靠近工件加工部位的地方增加辅助支承。夹具体的设计应通盘考虑，使上述各部分通过夹具体联系起来，形成一套完整的夹具。此外，还应考虑夹具与机床的联接。因为是在立式钻床上使用，夹具安装在工作台上可直接用钻套找正并用压板固定，故只需在夹具体上留出压板压紧的位置即可。又考虑到夹具的刚度和安装的稳定性，夹具体底面设计成周边接触的形式，如图 7.35(d)所示。

(3) 在绘制夹具草图的基础上绘制夹具总图，标注尺寸和技术要求，如图 7.35(d)所示。

(4) 对零件进行编号，填写明细表和标题栏，绘制零件图。

7.4.3 夹具设计中的几个重要问题

1) 夹具设计的经济性分析

在零件加工过程中，对于某一工序而言，是否要使用夹具，应使用什么类型的夹具(通用夹具、专用夹具、组合夹具等)，以及在确定使用专用夹具的情况下应设计什么档次的夹具，这些问题在夹具设计前必须认真地考虑。除了从保证加工质量的角度考虑外，还应作经济性分析，以确保所设计的夹具在经济上合理。具体内容可参考文献。

2) 成组设计思想的采用

以相似性原理为基础的成组技术在设计、制造、管理等各方面均有广泛的应用，夹具设计也不例外。在夹具设计中应用成组技术的主要方法是根据夹具的名称、类别、所用机床、服务对象、结构形式、尺寸规格、精度等级对夹具及夹具零部件进行分类编码，并将设计图纸及有关资料分类存放。当设计新夹具时，首先对已有的夹具进行检索，找出编码相同或相近的夹具，对它进行小的修改，或取其部分结构，供设计时参考。在设计夹具零部件时，亦可采用相同的方法，或直接将已有的夹具零部件拿来使用，或在原来图纸基础上作些小的改动。不论采用哪种方法，均可大大减小设计工作量，加快设计速度。

此外，在夹具设计中采用成组技术原理，有利于夹具设计的标准化和通用化。

3) 夹具总图上尺寸及技术条件的标注

夹具总图上标注尺寸及技术要求的目的主要是为了便于拆零件图，便于夹具装配和检验。为此应有选择地标注尺寸及技术要求。

(1) 夹具总图上应标注以下内容。

① 夹具外形轮廓尺寸。

② 与夹具定位元件、导向元件及夹具安装基准面有关的配合尺寸、位置尺寸及公差。

③ 夹具定位元件与工件的配合尺寸。

④ 夹具导向元件与刀具的配合尺寸。

⑤ 夹具与机床的连接尺寸及配合尺寸。

⑥ 其他重要配合尺寸。

夹具上有关尺寸公差和形位公差通常取工件上相应公差的 1/5～1/2。当生产批量较大时，考虑夹具的磨损，应取较小值，为使夹具制造不十分困难，可取较大值。当工件上相应的公差为自由公差时，夹具上有关尺寸常取±0.1mm 或±0.05mm，角度公差(包括位置公差)常取±10′或±5′。确定夹具公差带时，还应注意保证夹具的平均尺寸与工件上相应的平均尺寸一致，即保证夹具上有关尺寸的公差带刚好落在工件上相应尺寸公差带的中间。

(2) 夹具总图上应标注的技术要求。

① 定位元件与定位元件表面之间的相互位置精度要求。

② 定位元件的定位表面与夹具安装面之间的相互位置精度要求。

③ 定位元件的定位表面与引导元件工作表面之间的相互位置精度要求。

④ 引导元件与引导元件工作表面之间的相互位置精度要求。

⑤ 定位元件的定位表面或引导元件的工作表面对夹具找正基准面的位置精度要求。

⑥与保证夹具装配精度有关的或与检验方法有关的特殊的技术要求。

知识链接

目前，计算机辅助设计技术已渗透到了机床夹具设计之中，产生了计算机辅助机床夹具设计(Computer Aided Fixture Design，CAFD)技术。该技术就是利用计算机，进行机床夹具的构思、设计、计算和绘图等工作，从而提高夹具设计的效率，特别是专用夹具的设计与制造实现了半自动化和自动化。

本 章 小 结

装夹包括定位和夹紧。机床夹具就是用来实现正确装夹的工艺装备。夹具一般由定位元件或装置、夹紧元件或装置、对刀及导引元件或装置、夹具体和其他装置或元件组成。夹具在装夹时必须满足 3 个条件：工件在夹具中有正确的定位、夹具对机床具有正确的相互位置关系和夹具对刀具的正确调整。夹具可以从不同的角度进行分类。

在进行定位时，用合理分布的 6 个支承点约束工件的 6 个自由度，使工件的位置完全确定，这称为六点定位原理。根据工件在各工序的加工精度要求和选择定位元件的情况，工件的定位通常有如下几种情况：完全定位、部分定位(不完全定位)、欠定位和过定位(重复定位)。

平面定位的主要形式是支承定位。夹具上常用的支承元件，根据是否起限制自由度的作用，能否调整等分为固定支承、可调支承、自位支承(浮动支承)和辅助支承。工件以圆柱孔定位时常用的定位元件有定位销和心轴等。工件以外圆表面定位时常用的定位元件有定位套、半圆套和 V 形块等。此外工件还可以以其他表面定位，以组合表面定位。

一般夹紧装置由动力源和夹紧机构两个基本部分组成。夹紧装置的设计有一定的原则要求，其核心问题是正确地确定夹紧力。夹紧力包括方向、作用点和大小 3 个要素，它们的确定是夹紧机构设计中首先要解决的问题。常用夹紧机构有斜楔夹紧机构，螺旋夹紧机构，偏心夹紧机构，铰链夹紧机构，定心、对中夹紧机构和联动夹紧机构等，本章分别对这些机构进行了介绍和分析。

专用夹具设计应满足基本要求。专用夹具设计的一般步骤包括：研究原始资料，明确设计要求；拟订夹具结构方案，绘制夹具结构草图；绘制夹具总图，标注有关尺寸及技术要求；绘制零件图。

习　　题

(1) 什么是工件的装夹？

(2) 机床夹具一般由哪几部分组成？

(3) 夹具装夹时保证加工精度的条件有哪些？

(4) 什么是六点定位原理？

(5) 分析图 7.36 所示定位方案：①指出各定位元件所限制的自由度；②判断有无欠定位或过定位；③对不合理的定位方案提出改进意见。

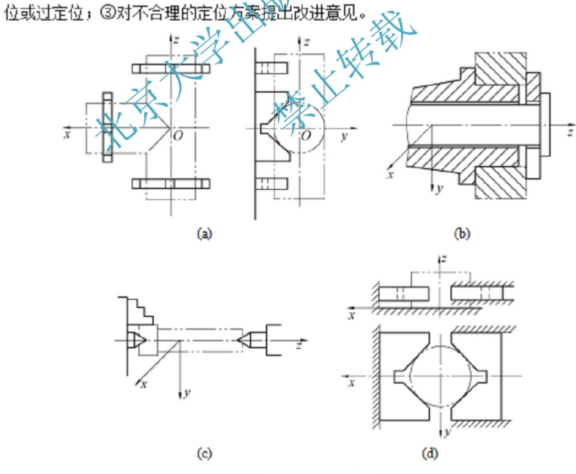
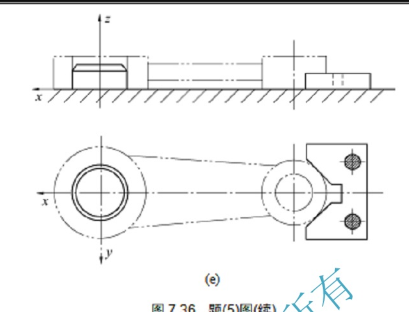


图 7.36　题(5)图

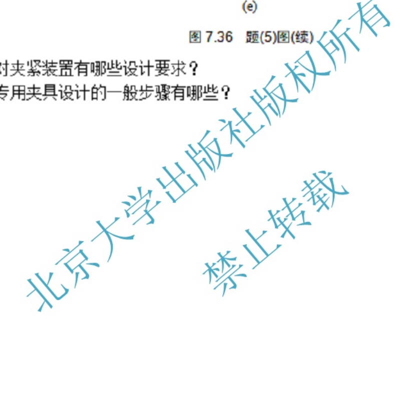


(e)

图 7.36　题(5)图(续)

(6) 对夹紧装置有哪些设计要求？

(7) 专用夹具设计的一般步骤有哪些？



第 8 章　典型零件加工

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
掌握轴类零件加工的基础知识	轴类零件概述	15%	
理解卧式车床主轴的加工工艺过程	卧式车床主轴加工工艺过程	25%	
理解丝杠加工工艺分析	丝杠加工工艺分析	10%	
掌握箱体类零件加工的基础知识及孔系加工	箱体类零件概述、拟定箱体类零件机械加工工艺规程的原则、孔系加工	15%	
理解箱体类零件的加工工艺过程	箱体类零件的加工工艺过程	10%	
掌握圆柱齿轮加工的基础知识	概述、齿轮类零件的工艺分析	15%	
理解典型齿轮零件加工工艺过程	典型齿轮零件加工工艺过程	10%	

引例

滚珠丝杠具有摩擦系数小、传动效率高、精度高等优点，非常适合高精度、高转速的传动情形，广泛应用于数控机床中。右图即为几种滚珠丝杠。

滚珠丝杠的优点是由其自身的高制造精度所保证的。滚珠丝杠由丝杠、螺母、滚动体及返向装置等组成。其中丝杠的加工很有典型性。试想，一根轴是如何加工成如此精确的丝杠的？可带着这个问题开始本章的学习。



滚珠丝杠

8.1　轴类零件加工

8.1.1　轴类零件概述

1．轴类零件的功用与结构特点

轴类零件是机器中最常见的一类零件。它主要起支承传动件和传递转矩的作用。轴是

旋转体零件，其长度大于直径，主要由内外圆柱面、内外圆锥面、螺纹、花键、横孔及沟槽等组成。轴类零件根据其结构的不同又可以分为不同的类别，如图8.1所示。

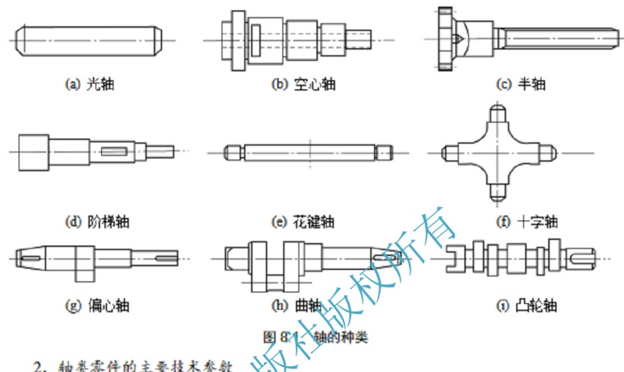


图8.1 轴的种类

2. 轴类零件的主要技术参数

1) 尺寸精度

轴颈是轴类零件的主要表面，它影响轴的回转精度及工作状态。轴颈的直径精度根据其使用要求通常为IT6～9，精密轴颈可达IT5。

2) 几何形状精度

轴颈的几何形状精度(圆度、圆柱度)，应限制在直径公差范围内。对几何形状精度要求较高时，可在零件图上另行规定其允许的公差。

3) 位置精度

装配传动件的配合轴颈相对于装配轴承的支承轴颈的同轴度以及轴颈与支承端面的垂直度通常要求较高。普通精度轴的配合轴颈相对支承轴颈的径向圆跳动一般为0.01～0.03mm，精度高的轴为0.001～0.005mm，端面圆跳动为0.005～0.01mm。

4) 表面粗糙度

根据零件的表面工作部位的不同来确定，一般说来，支承轴颈的表面粗糙度*Ra*为0.16～0.63μm，配合轴颈的表面粗糙度*Ra*为0.63～2.5μm。

3. 轴类零件的材料和毛坯

合理选用材料和规定热处理的技术要求，对提高轴类零件的强度和使用寿命有重要意义，同时，对轴的加工过程也有极大的影响。

1) 轴类零件的材料

轴类零件常用45钢；对中等精度而转速较高的轴类零件，可选用40Cr等合金钢；精度较高的轴，有时还用GCr15轴承钢和65Mn弹簧钢等材料，也可选用球墨铸铁；对于在高速重载等条件下工作的轴，可选用20CrMnTi、20Mn2B、20Cr等低碳合金钢或38CrMoAl中碳合金渗氮钢。

2) 轴类零件的毛坯

轴类零件的毛坯最常用的是圆棒料和锻件，只有某些大型的、结构复杂的轴(如曲轴)，在质量允许时才采用铸件(铸钢或球墨铸铁)。由于毛坯经过加热锻造后，能使金属内部的纤维组织沿表面均匀分布，可获得较高的抗拉、抗弯及抗扭强度，所以除光轴、直径相差不大的阶梯轴可使用热轧棒料或冷拉棒料外，一般比较重要的轴大都采用锻件，这样既可改善力学性能，又能节约材料、减少机械加工量。

根据生产规模的大小，毛坯的锻造方式有自由锻和模锻两种。自由锻多用于中小批生产；模锻需昂贵的设备和专用锻模，只适用于大批量生产。

另外，对于一些大型轴类零件，例如低速船用柴油机曲轴，还可以采用组合毛坯，即将轴预先分成几段毛坯，各自锻造加工后，再采用红套等过盈连接方式拼装成整体毛坯。

4. 轴类零件的预加工

轴类零件在切削加工之前，应对其毛坯进行预加工。预加工包括校正、切断、切端面和钻中心孔、荒车。

(1) 校正：校正棒料毛坯在制造、运输和保管过程中产生的弯曲变形，以保证加工余量均匀及送料装夹的可靠。校正可在各种压力机上进行。

(2) 切断：当采用棒料毛坯时，应在车削外圆前按所需长度切断。切断可在弓锯床上进行，高硬度棒料的切断可在带有薄片砂轮的切割机上进行。

(3) 切端面和钻中心孔：中心孔是轴类零件加工最常用的定位基准面，为保证钻出的中心孔不偏斜，应先切端面后再钻中心孔。

(4) 荒车：如果轴的毛坯是锻件或大型铸件，则需要进行荒车加工，以减少毛坯外圆表面的形状误差，使后续工序的加工余量均匀。

5. 轴类零件的热处理

轴的质量除与所选钢材的种类有关外，还与热处理有关。轴的锻造毛坯在机械加工之前，均需进行正火或退火处理(碳的质量分数大于0.7%的碳钢和合金钢)，使钢材的晶粒细化(或球化)，以消除锻造后的残余应力，降低毛坯硬度，改善切削加工性能。

凡要求局部表面淬火以提高耐磨性的轴，须在淬火前安排调质处理。当毛坯余量较大时(如锻件)，调质放在粗车之后、半精车之前，以便使粗车产生的内应力得以在调质时消除；当毛坯余量较小时(如棒料)，调质可放在粗车(相当于锻件的半精车)之前进行。高频淬火处理一般放在半精车之后，由于主轴只需要局部淬硬，故对精度有一定要求。而不需淬硬部分的加工，如车螺纹、铣键槽等工序，均安排在局部淬火和粗磨之后。对于精度较高的主轴在局部淬火及粗磨之后还需低温时效处理，以消除淬火及磨削中产生的残余应力和残余奥氏体，控制尺寸稳定；对于整体淬火的精密主轴，在淬火粗磨后，要经过较长时间的低温时效处理；对于精度要求更高的主轴，在淬火之后，还要进行定性处理，定性处理一般采用冰冷处理方法，以进一步消除加工应力，保持主轴精度。

6. 工艺过程分析

轴的工艺规程编制是生产中最常遇到的工艺工作。用途、结构形状、技术要求、产量大小不同的轴类零件，其加工工艺也有所差异。轴类零件加工的主要问题是如何保证各加

工表面的尺寸精度、表面粗糙度和主要表面之间的相互位置精度。

轴类零件加工的典型工艺路线如下。

毛坯及其热处理→预加工→车削外圆→铣键槽等→热处理→磨削。

1) 定位基准的选择

对实心的轴类零件，精基准面就是顶尖孔，满足基准重合和基准统一，而对于像 CA6140 的空心主轴，除顶尖孔外还有轴颈外圆表面并且两者交替使用，互为基准。

2) 加工阶段的划分

主轴加工过程中的各加工工序和热处理工序均会不同程度地产生加工误差和应力，因此要划分加工阶段。主轴加工基本上划分为下列 3 个阶段。

(1) 粗加工阶段。

① 毛坯处理：毛坯备料、锻造和正火。

② 粗加工：锯去多余部分，铣端面、钻中心孔和荒车外圆等。

(2) 半精加工阶段。

① 半精加工前热处理：对于 45 钢一般采用调质处理以达到 220~240 HBS。

② 半精加工：车工艺锥面(定位锥孔)，半精车外圆端面和钻深孔等。

(3) 精加工阶段。

① 精加工前热处理、局部高频淬火。

② 精加工前各种加工粗磨定位锥面、粗磨外圆、铣键槽和花键槽，以及车螺纹等。

③ 精加工：精磨外圆和内外锥面以保证主轴最重要表面的精度。

3) 加工顺序的安排和工序的确定

具有空心和内锥特点的轴类零件，在考虑支承轴颈、一般轴颈和内锥等主要表面的加工顺序时，可有以下几种方案。

第一种：外表面粗加工－钻深孔－外表面精加工－锥孔粗加工－锥孔精加工。

第二种：外表面粗加工－钻深孔－锥孔粗加工－锥孔精加工－外表面精加工。

第三种：外表面粗加工－钻深孔－锥孔粗加工－外表面精加工－锥孔精加工。

轴类零件各表面先后加工顺序，在很大程度上与定位基准的转换有关。当零件加工用的粗、精基准选定后，加工顺序就大致可以确定了。因为各阶段开始总是先加工定位基准面，即先行工序必须为后面的工序准备好所用的定位基准。对于用 CA6140 车床加工主轴类的轴件的加工顺序，以第三种方案为佳。具体原因读者可自行分析。

工序的确定要按加工顺序进行，应当掌握两个原则。

(1) 工序中的定位基准面要安排在该工序之前加工。

(2) 对各表面的加工要粗、精分开，先粗后精，多次加工，以逐步提高其精度和粗糙度，主要表面的精加工应安排在最后。

为了改善金属组织和加工性能而安排的热处理工序，如退火、正火等，一般应安排在机械加工之前。为了提高零件的机械性能和消除内应力而安排的热处理工序，如调质、时效处理等，一般应安排在粗加工之后，精加工之前。

4) 大批生产和小批生产工艺过程的比较

(1) 定位基准的选择。不同生产类型下主轴加工定位基准的选择见表 8-1。

表 8-1　不同生产类型下主轴加工定位基准的选择

工序名称	定位基准面	
	大批生产	小批生产
加工顶尖孔	毛坯外圆	划线
粗车外圆	顶尖孔	顶尖孔
钻深孔	粗车后的支承轴颈	夹一端，托另一端
半精车和精车	两端锥堵的顶尖孔	夹一端，顶另一端
粗、精磨外锥	两端锥堵的顶尖孔	两端锥堵的顶尖孔
粗、精磨外圆	两端锥堵的顶尖孔	两端锥堵的顶尖孔
粗、精磨锥孔	两支承轴颈外表面或靠近两支承轴	夹小端，托大端

(2) 轴端两顶尖孔的加工。在单件小批生产时，多在车床或钻床上通过划线找正加工。在成批生产时，可在中心孔钻床上加工。专用机床可在同一工序中铣出两端面并打好顶尖孔。

(3) 外圆表面的加工。在单件小批生产时，多在普通车床上进行；而在大批生产时，则广泛采用高生产效率的多刀半自动车床或液压仿形车床等设备。

(4) 深孔加工。在单件小批生产时，通常在车床上用麻花钻头进行加工。在大批量生产中，可采用锻造的无缝钢管作为毛坯，从根本上免去了深孔加工工序；若是实心毛坯，可用深孔钻头在深孔钻床上进行加工；如果孔径较大，还可采用套料的先进工艺。

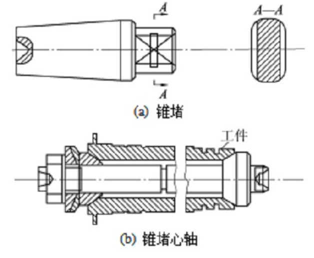
(5) 花键轴加工。在单件小批生产时，常在卧式铣床上用分度头分度以圆盘铣刀铣削；而在成批生产(甚至小批生产)都广泛采用花键滚刀在专用花键轴铣床上加工。

(6) 前后支承轴颈以及与其有较严格的位置精度要求的表面精加工，在单件小批生产时，多在普通外圆磨床上加工，而在成批大量生产中多采用高效的组合磨床加工。

7. 主轴加工中的几个工艺问题

1) 锥堵和锥堵心轴的使用

对于空心的轴类零件，如通孔直径较小的轴，可直接在孔口倒出宽度不大于 2 mm 的 60° 锥面，代替中心孔。而当通孔直径较大时，则不宜用倒角锥面代之，一般都采用锥堵或锥堵心轴的顶尖孔作为定位基准，如图 8.2 所示。



(a) 锥堵

(b) 锥堵心轴

图 8.2　锥堵与锥堵心轴

使用锥堵或锥堵心轴时应注意以下事项。

(1) 一般不中途更换或拆装，以免增加安装误差。

(2) 锥堵心轴要求两个锥面应同轴，否则拧紧螺母后会使工件变形。

2) 顶尖孔的研磨

因热处理、切削力、重力等的影响，常常会降低顶尖孔的精度，因此在热处理工序之后和磨削加工之前，对顶尖孔要进行研磨，以消除误差。常用的研磨方法有：用铸铁顶尖研磨、用油石或橡胶轮研磨、用硬质合金顶尖刮研、用中心孔磨床磨削。

3) 外圆加工方法

(1) 外圆表面的车削加工。

根据毛坯的制造精度和工件最终加工要求，外圆车削一般可分为粗车、半精车、精车、精细车。

粗车的目的是切去毛坯硬皮和大部分余量，加工后工件尺寸精度IT11～13，表面粗糙度*Ra*为50～12.5μm；半精车的尺寸精度可达IT8～IT10，表面粗糙度*Ra*为6.3～3.2μm，半精车可作为中等精度表面的终加工，也可作为磨削或精加工的预加工；精车后的尺寸精度可达IT7～IT8，表面粗糙度*Ra*为1.6～0.8μm；精细车后的尺寸精度可达IT6～IT7，表面粗糙度*Ra*为0.4～0.025μm；精细车尤其适合于有色金属加工，有色金属一般不宜采用磨削，所以常用精细车代替磨削。

(2) 外圆表面的磨削加工。

磨削是外圆表面精加工的主要方法之一。它既可加工淬硬后的表面，又可加工未经淬火的表面。根据磨削时工件定位方式的不同，外圆磨削可分为中心磨削和无心磨削两大类。

中心磨削即普通的外圆磨削，被磨削的工件由中心孔定位，在外圆磨床或万能外圆磨床上加工。磨削后工件尺寸精度可达IT6～IT8，表面粗糙度*Ra*为0.8～0.1μm。按进给方式不同分为纵向进给磨削法和横向进给磨削法。无心磨削是一种高生产率的精加工方法，以被磨削的外圆本身作为定位基准。其工件尺寸精度可达IT6～IT7，表面粗糙度*Ra*为0.8～0.2μm。

在外圆表面精加工后，往往还要进行精密加工。外圆表面的精密加工方法常用的有高精度磨削、超精度加工、研磨和滚压加工等。

4) 深孔加工

一般孔的深度与孔径之比大于5就算深孔。在单件、小批生产中，加工深孔时，常用接长的麻花钻头，以普通的冷却润滑方式，在改装过的普通车床上进行加工。为了排屑，每加工一定长度之后，须把钻头退出。这种加工方法，不需要特殊的设备和工具。由于钻头有横刃，轴向力较大，两边切削刃又不容易磨得对称，因此加工时钻头容易偏斜，此法的生产率很低。在批量生产中，深孔加工常采用专门的深孔钻床和专用刀具，以保证质量和生产率。这些刀具的冷却和切屑的排出，很大程度上决定于刀具结构特点和冷却液的输入方法。

知识链接

目前应用的冷却与排屑的方法有两种。(1)内冷却外排屑法。加工时冷却液从钻头的内部输入，从钻头外部排出。高压冷却液直接喷射到切削区，对钻头起冷却润滑作用，并且带着切屑从刀杆和孔壁之间的空间排出。(2)外冷却内排屑法。冷却液从钻头外部输入，有一定压力的冷却液经刀杆与孔壁之间的通道进入切削区，起冷却润滑作用，然后经钻头和刀杆内孔带着大量切屑排出。一般大于16mm的深孔，可采用内排屑方式。

8.1.2 卧式车床主轴加工工艺过程

图8.3为卧式车床主轴零件简图。根据对零件简图的分析，该主轴零件的结构具有如下特点：从形状上看，该工件为多阶梯结构的空心轴；从长度与直径之比(L/d≈9)看，该工件仍接近于刚性主轴；从表面加工类型看，外圆表面有圆柱面、外锥(锥度为1∶12)的支承轴颈*A*、*B*两处和端部用于安装卡盘的短锥(斜度为7°7′30″)、花键、单键槽、螺纹(三处)；内孔表面有两头内锥(大头为莫氏6号，小头为锥度1∶20的工艺锥)和中部ϕ52mm通孔。

1．卧式车床主轴技术条件的分析

(1) 支承轴颈的技术要求。主轴两支承轴颈*A*、*B*的圆度允差0.005mm，径向跳动允差0.005mm，两支承轴颈的1∶12锥面接触率大于70%，表面粗糙度R_a为0.4μm。支承轴颈直径按IT5级精度制造。由于主轴支承轴颈是主轴部件的装配基准面，因而它的制造精度直接影响到主轴部件的回转精度。

主轴外圆的圆度要求，对于一般精度的机床，其允差通常不超过尺寸公差的50%，对于较高精度的机床，则不超过25%，对于高精度的机床，则应在5%~10%之间。

(2) 锥孔的技术要求。主轴锥孔(莫氏6号)是用来安装顶尖或工具锥柄的，其轴线必须与支承轴颈的基准轴线严格同轴，否则会使加工工件产生位置误差。由8.3图可知，锥孔轴线对支承轴颈*A*、*B*的跳动，近轴端允差0.005mm，离轴端300mm处允差0.01mm，锥面的接触率大于70%，表面粗糙度Ra为0.4μm，硬度要求HRC48。

(3) 短锥的技术要求。主轴前端短锥及端面是安装卡盘的定位表面，为了保证卡盘的定位精度，这个短锥也必须与支承轴颈的轴线同轴、端面与轴线垂直，否则将产生夹具安装误差。

短锥对主轴支承轴颈*A*、*B*的径向圆跳动允差0.008mm，端面*D*对轴颈*A*、*B*的端面圆跳动允差0.008mm，锥面及端面的粗糙度均为Ra为0.8μm。

(4) 空套齿轮轴颈的技术要求。空套齿轮的轴颈对支承轴颈*A*、*B*的径向圆跳动允差为0.015mm。

(5) 螺纹的技术要求。这是用于限制与之配合的压紧螺母的端面圆跳动量所必须设置的要求。因此在加工主轴螺纹时，必须控制螺纹表面轴心线与支承轴颈轴心线的同轴度，一般规定不超过0.025mm。

可见，主轴的主要加工表面是两个支承轴颈、锥孔、前端短锥面及其端面以及装齿轮的各个轴颈等。而保证支承轴颈本身的尺寸精度、几何形状精度、两个支承轴颈之间的同轴度、支承轴颈与其他表面的相互位置精度和表面粗糙度，则是主轴加工的关键。

2. 加工工艺过程

生产类型为大批量生产；材料为 45 钢；毛坯为模锻件。经过对主轴的结构特点与技术要求的分析后，根据生产批量、设备条件等因素，考虑主轴的工艺过程。表 8-2 为某厂大批量生产图 8.3 所示主轴的工艺过程。

3. 工艺过程分析

从加工工艺过程可以看出，在拟定主轴工艺过程时，应考虑下列一些带有共性的问题。

1) 合理选择定位基准面

轴类零件的定位基准面，最常用的是两中心孔。因轴类零件各外圆表面、锥孔、螺纹表面的同轴度以及端面对主轴轴线的垂直度是其相互位置精度的主要项目，而这些表面的设计基准一般都是轴的中心线，如果用两中心孔定位，就能符合基准重合原则。而且，由于多数工序采用中心孔作为定位基准面，能够最大限度地在一次安装中加工出多个外圆和端面，这也符合基准统一原则。所以，只要可能，就应尽量采用中心孔作为轴加工的定位基准面。

但在下列 3 种情况下则不能采用中心孔面作为定位基准面。

(1) 粗加工外圆时，为提高工件刚度，则采用轴的外圆表面作为基准面，或以外圆和中心孔同时作定位基准面，即一夹一顶的情况。

(2) 当主轴为通孔零件时，工艺上常采用带有中心孔的锥堵或锥堵心轴(如图 8.2 所示)。当主轴孔的锥度较小时，使用锥堵，当锥孔锥度较大时或主轴孔为圆柱孔时，可用带锥堵的拉杆心轴——锥堵心轴。

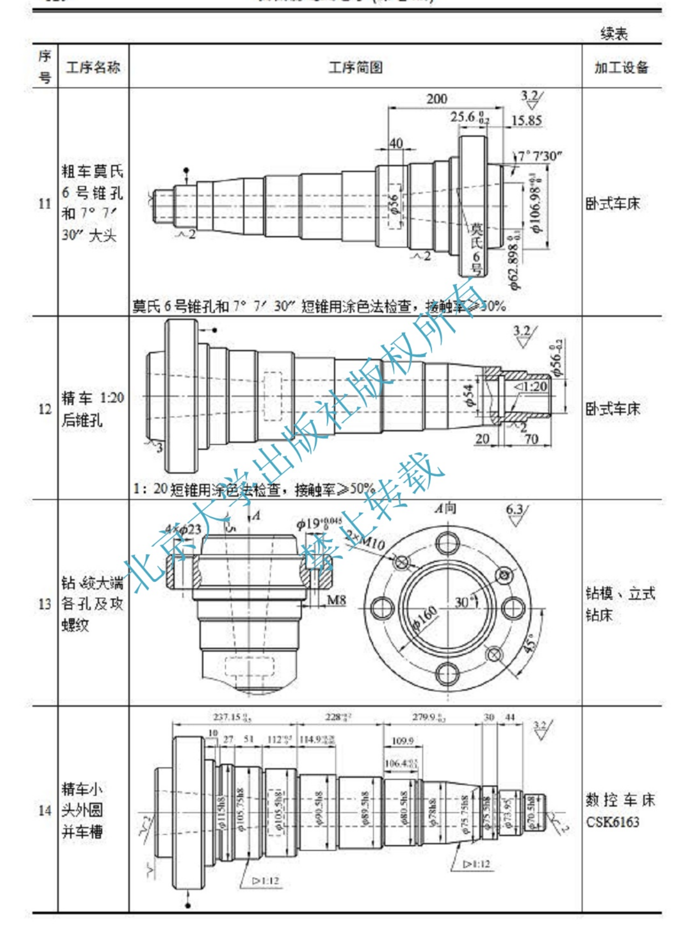
锥堵应具有较高的精度，锥堵的中心孔既是锥堵本身制造的定位基准面，也是磨削主轴的精基准面，所以必须要保证锥堵上锥面与中心孔有较高的同轴度。其次是在使用锥堵过程中，应尽量减少锥堵安装次数。对于中小批生产来说，锥堵安装后一般不中途更换。

(3) 在磨主轴锥孔时，一般多选用装配基准面前、后支承轴颈作为定位基准面，这样可消除基准不重合所引起的定位误差，以保证锥孔与前、后支承轴颈的同轴度。

请思考表 8-2 所引用的主轴工艺过程，工艺过程一开始，就以外圆面作粗基准面铣端面、钻中心孔，为粗车外圆准备了定位基准，而粗车外圆又为深孔加工准备了定位基准面。此后，为了给半精加工外圆和精加工外圆准备定位基准面，先加工好前后锥孔，以便安装锥堵。由于支承轴颈是磨锥孔的定位基准面，所以终磨锥孔前必须磨好轴颈表面。可见，工件加工时定位基准面选择是否合理，不但影响被加工表面的相互位置精度，而且也大体确定了各表面先后加工的顺序。

表 8-2　主轴加工工艺过程

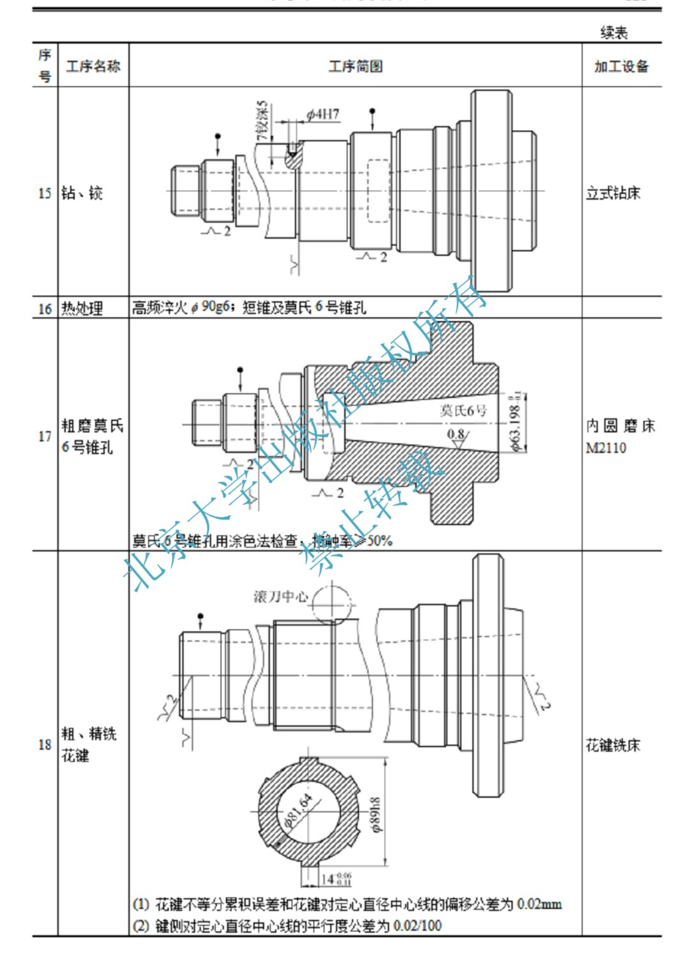
序号	工序名称	工序简图	加工设备
1	备料		
2	精锻		立式精锻机
3	热处理	正火	
4	锯头		
5	铣端面、钻中心孔		专用机床
6	粗车外圆	车各外圆面	卧式车床
7	热处理	调质 220～240HBS	
8	车大端各部		卧式车床
9	仿形车小端各部		仿形车床 CE7120
10	钻深孔		深孔钻床



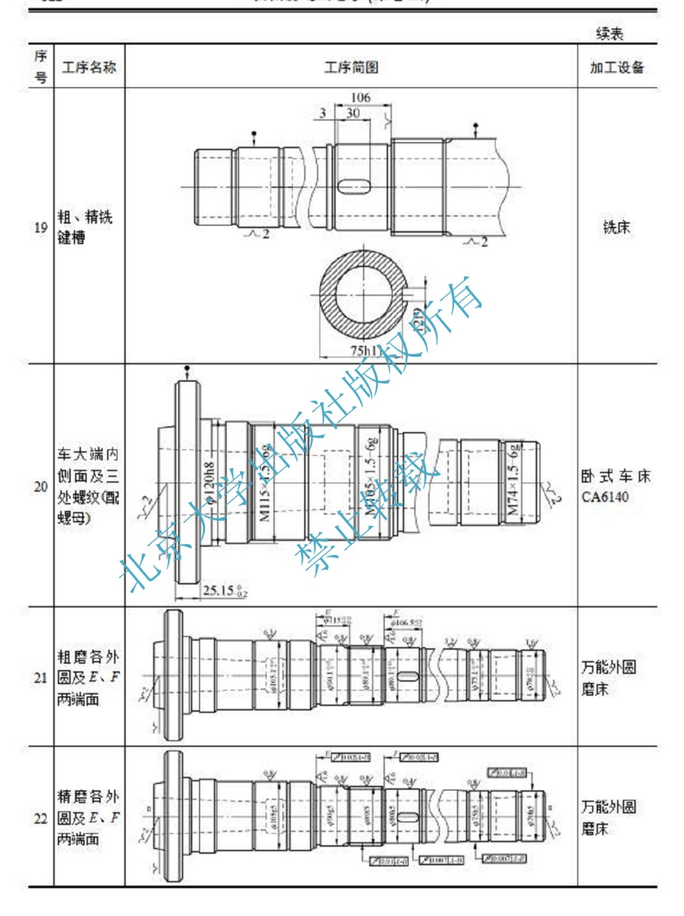
续表

序号	工序名称	工序简图	加工设备
11	粗车莫氏6号锥孔和7° 7′ 30″ 大头	莫氏6号锥孔和7° 7′ 30″ 短锥用涂色法检查，接触率≥50%	卧式车床
12	精车 1:20 后锥孔	1：20短锥用涂色法检查，接触率≥50%	卧式车床
13	钻、铰大端各孔及攻螺纹		钻模、立式钻床
14	精车小头外圆并车槽		数控车床 CSK6163

续表

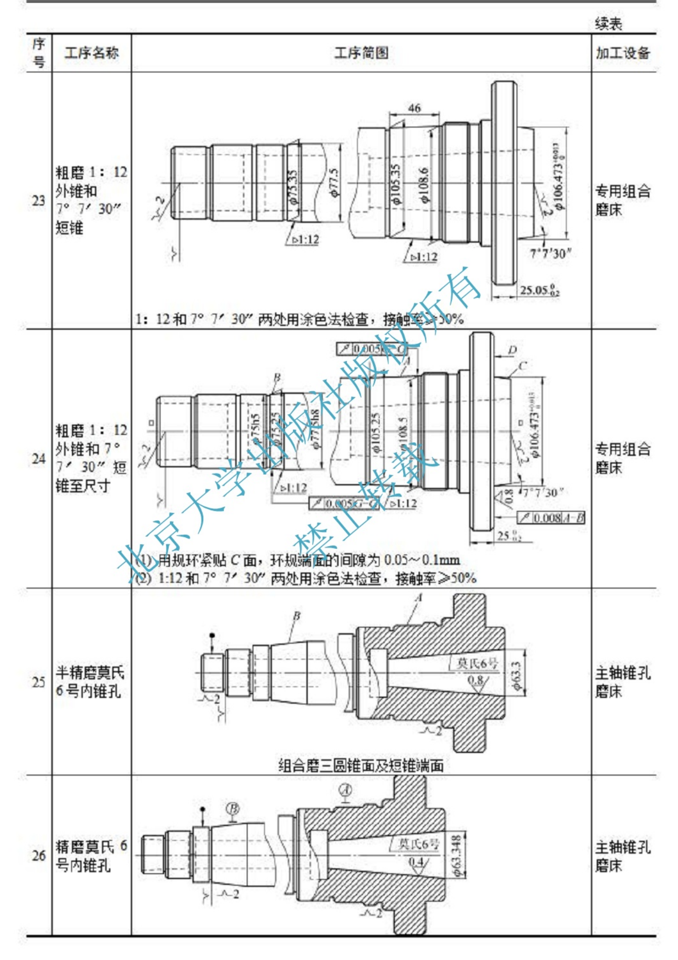


序号	工序名称	工序简图	加工设备
15	钻、铰		立式钻床
16	热处理	高频淬火 φ90g6；短锥及莫氏 6 号锥孔	
17	粗磨莫氏 6 号锥孔	莫氏 6 号锥孔用涂色法检查，接触率≥50%	内圆磨床 M2110
18	粗、精铣花键	(1) 花键不等分累积误差和花键对定心直径中心线的偏移公差为 0.02mm (2) 键侧对定心直径中心线的平行度公差为 0.02/100	花键铣床



续表

序号	工序名称	工序简图	加工设备
19	粗、精铣键槽		铣床
20	车大端内侧面及三处螺纹(配螺母)		卧式车床CA6140
21	粗磨各外圆及E、F两端面		万能外圆磨床
22	精磨各外圆及E、F两端面		万能外圆磨床



续表

序号	工序名称	工序简图	加工设备
23	粗磨 1：12 外锥和 7° 7′ 30″ 短锥	1：12 和 7° 7′ 30″ 两处用涂色法检查，接触率≥50%	专用组合磨床
24	粗磨 1：12 外锥和 7° 7′ 30″ 短锥至尺寸	(1) 用规环紧贴 C 面，环规端面的间隙为 0.05～0.1mm (2) 1:12 和 7° 7′ 30″ 两处用涂色法检查，接触率≥50%	专用组合磨床
25	半精磨莫氏 6 号内锥孔	组合磨三圆锥面及短锥端面	主轴锥孔磨床
26	精磨莫氏 6 号内锥孔		主轴锥孔磨床

续表

序号	工序名称	工序简图	加工设备
		(1) 莫氏锥孔用涂色法检查，接触率为工作长度的 75%以上，锥孔的接触应靠近大端 (2) 莫氏 6 号锥孔对轴颈 *A*、*B* 的跳动：近轴端 0.005 mm；300 mm 处为 0.01mm (3) 莫氏 6 号锥孔对主轴端面的位移偏差为±2mm	
27	去锐边、毛刺、校正 M8、MIO 螺孔	—	
28	检查	按图样技术要求项目检查	

2) 加工阶段划分

从表 8-2 主轴加工工艺过程可以看出其加工过程大致划分为 3 个阶段：调质以前的工序为各主要表面的粗加工阶段；调质以后到表面淬火前的工序为半精加工阶段；表面淬火以后的工序为精加工阶段。要求较高的支承轴颈和莫氏 6 号锥孔的精加工，放在最后进行。同时，还可以看出，整个主轴加工的工艺过程，就是以主要表面(特别是支承轴颈)的粗加工、半精加工和精加工为主线，适当穿插其他表面的加工工序而组成的。

3) 应安排足够的热处理工序

在主轴加工的整个过程中，应安排足够的热处理工序以保证主轴的力学性能及加工精度的要求，并改善工件的切削加工性能。

毛坯锻造后安排正火处理，以消除锻造应力，改善切削性能；粗加工后安排调质处理，以提高其力学性能，并为表面淬火准备良好的金相组织；半精加工后安排表面淬火处理，以提高其耐磨性。

4) 加工顺序的安排

根据先粗后精、先主后次的工艺原则，主轴工序安排大致如下：备料→正火→切端面钻中心孔→粗车→调质→半精车→精车→表面淬火→粗、精磨外圆表面→磨内锥孔。在安排加工顺序时应注意以下几点。

① 深孔加工。深孔加工应安排在调质以后进行，以免调质使深孔产生弯曲变形而影响棒料的通过，并且应安排在外圆粗车或半精车以后，以便有一个较精确的轴颈作定位基准，以保证与外圆同心，使主轴壁厚均匀。

② 外圆的加工顺序。先加工大直径外圆，然后再加工小直径外圆，以免一开始就降低了工作的刚度。

③ 次要表面加工安排。主轴上的花键、键槽等次要表面的加工，一般都放在外圆精车或粗磨之后，精磨外圆之前进行。这是因为如果在精车前就铣出键槽，一方面在精车时，由于断续切削而产生振动，既影响加工质量，又容易损坏刀具；另一方面，也难控制键槽的尺寸要求。但是，它们的加工也不宜放在主要表面精磨之后进行，以免破坏主要表面已有的精度。

主轴上的螺纹均有较高的要求，如安排在淬火前加工，则淬火后产生的变形，会影响螺纹和支承轴颈的同轴度误差，因此，车螺纹宜安排在主轴局部淬火之后进行。

④ 主轴锥孔的磨削。主轴锥孔对主轴支承轴颈的径向圆跳动，是机床的主要精度指标，

因此锥孔的磨削，是主要加工的关键工序之一。主轴锥孔磨削一般采用专用夹具，该夹具如图 8.4 所示。

夹具由底座 1、支架 2 及浮动夹头 3 三部分组成，两个支架固定在底座上，作为工件定位基准面的两段轴颈放在支架的两个 V 形块上，V 形块镶有硬质合金，以提高耐磨性，并减少对工件轴颈的划痕，工件的中心高应正好等于磨头砂轮轴的中心高，否则将产生双曲线误差，影响内锥孔的接触精度。后端的浮动卡头用锥柄装在磨床主轴的锥孔内，工作尾端插于弹性套内，用弹簧把浮动卡头外壳连同工件向左拉，通过钢球压向镶有硬质合金的锥柄端面，限制工件的轴向窜动。采用这种连接方式，可以保证工件支承轴颈的定位精度不受内圆磨床主轴回转误差的影响，也可减少由于机床本身振动对加工质量的影响。

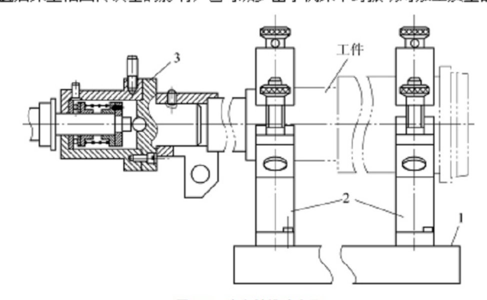


图 8.4　磨主轴锥孔夹具

1—底座　2—支架　3—浮动夹头

8.1.3　丝杠加工工艺分析

1. 概述

1) 丝杠的功用、分类与结构特点

丝杠是通过丝杠螺母副将旋转运动变换为执行件的直线运动的传动装置，它不仅要传递一定的转矩，而且要准确地传递运动(可作精密直线分度元件)，所以对丝杠的强度、精度和耐磨性都有较高的技术要求。

丝杠按摩擦特性可分为滑动丝杠、滚动丝杠及静压丝杠三大类。其中滑动丝杠的结构比较简单、容易加工、应用最广；滚动丝杠摩擦系数小、制造精度高，适用于高精度、高转速的传动；静压丝杠可减少摩擦损失，用于重载大型机械传动。机床滑动丝杠的螺纹牙形大多采用梯形，这种螺纹牙形比三角形等螺纹牙形的传动效率高、精度好、加工比较方便。滚珠丝杠螺纹牙形也有多种，应用最广的是双圆弧形，双圆弧滚道接触刚度好、摩擦力小，承载能力强。

丝杠结构有整体式与接长式之分，通常丝杠均为单根整体。对于过长的丝杠(大于 4m)，由于受热处理与加工设备的限制，需采用分段加工，然后逐段连接成整体，称为接长丝杠。

丝杠就其结构形状来看是细而长的挠性轴，它的长径比很大，一般在 20～50 左右，刚性很差，加上其结构比较复杂，有要求很高的螺纹表面，又有阶梯及沟槽，因此，在加工过程中很容易产生变形，这是丝杠加工中影响精度的一个主要因素。为此，在编制丝杠的工艺过程时，应主要考虑如何防止弯曲变形，减少内应力和提高螺距精度等问题。

2) 丝杠的技术要求

机床梯形螺纹丝杠、螺母精度分为 6 个等级(4～9 级)。各级精度丝杠应用范围：4 级为目前最高级，一般很少应用；5 级用于精密仪器及精密机床，如坐标镗床、螺纹磨床；6 级用于精密仪器、精密机床及数控机床；7 级用于精密螺纹车床、齿轮加工机床及数控机床；8 级用于一般机床，如卧式车床、铣床；9 级用于刨床、钻床及一般机床的进给机构。

滚珠丝杠副和滚珠丝杠的精度等级也分为 6 个等级。具体可查阅有关标准。

3) 丝杠的材料及热处理

在丝杠材料选择时，应注意以下几点。

(1) 丝杠材料要有足够的强度，以保证传递一定的动力。

(2) 金相组织要有较高的稳定性，以保证丝杠在长期使用中不丧失原有的精度。

(3) 具有良好的热处理工艺(淬透性好、热处理变形小、不易产生裂纹)，并能获得较高的硬度、良好的耐磨性。

(4) 应有良好的加工性、易切削、不易发生粘刀或啃刀。

考虑上述条件，常用的丝杠材料分为两类：不淬硬丝杠材料，对于精度要求不高的丝杠，常选用 45 优质碳素结构钢，它具有综合的力学性能和耐磨性、成本低，但其加工工艺性不太好，易发生啃刀现象，加工后弯曲变形较大。使用 Y40Mn 易切钢，它能改善丝杠切削加工工艺性。对于精密机床丝杠大都选用碳素工具钢 T10A、T12A 等，这种钢具有颗粒珠光体组织，基本能全面满足加工工艺，耐磨性及组织稳定性好。

淬硬丝杠常用热处理变形小的合金钢。例如，9Mn2V 钢、CrWMn 钢、GCr15 钢(用于大径小于 50mm)及 GCr15SiMn 钢(用于大径在 50mm 以上)等。这些材料淬硬性好、淬火变形小、磨削时金相组织稳定，硬度可达 58～62HRC，对于滚珠丝杠尤为必要。9Mn2V 钢淬硬后比 CrWMn 钢具有较好的工艺性和尺寸稳定性，但淬透性差，故常用于直径小于 50mm 的精密淬硬丝杠。CrWMn 钢突出特点是热处理变形小，但热处理工艺性差，易产生裂纹，磨削工艺性也不好，易发生磨削裂纹，工艺上应严格控制质量，这种材料适宜制造高精度丝杠与其他精密零件。

表 8-3 所列为滚珠丝杠材料及热处理。对 GCr15、CrWMn、9CrSi，热处理硬度为 60～62HRC。整体淬火在热处理和磨削过程中变形较大，工艺性差，应尽可能采用表面硬化处理。对于高精度丝杠，尚需进行稳定处理，消除残余应力。

表 8-3 滚珠丝杠材料及热处理

钢号	热处理	应用	钢号	热处理	应用
20CrMoA	渗碳淬火	长度≤1m 的精密丝杠	GCr15	整体淬火	d_0 ≤40mm 的丝杠
42CrMoA	高或中频加热表面淬火	长度≤2.5m 的精密丝杠	GCr15SiMn	整体淬火	d_0 >40mm 的丝杠

续表

钢号	热处理	应用	钢号	热处理	应用
55	高或中频加热表面淬火	普通丝杠	9Mn2V	整体淬火	d_0 ≤40mm，长度≤2m 的丝杠
50Mn、60Mn	高或中频加热表面淬火	普通丝杠	CrWMn	整体淬火	d_0 =40～80mm，长度≤2m 的丝杠
38CrMoAlA	渗氮	长度＞2.5m 的精密丝杠	9Cr18	中频加热表面淬火	有抗腐蚀要求的丝杠

说明：(1) 硬度 58～60HRC。

(2) 丝杠长度≥1m 或精度要求高时，硬度可略低，但不得低于 56HRC。

(3) 磨削后的淬透层深度应保证：中频淬火≥2mm，高频淬火、渗碳淬火≥2mm，渗氮处理硬化层＞0.4mm。

2．细长轴车削加工特点

细长轴车削时容易产生弯曲变形，引起弯曲变形的主要因素如下。

(1) 工件自重影响。细长轴刚性差，如将工件平放在前后两支承上，则由于其自重会使它本身产生弯曲变形。

(2) 背向切削力的影响。

(3) 切削热的影响。由于细长轴散热性差，温升高，且轴向尺寸长，故膨胀量大，如两端为固定支承，轴就不能自由伸展，则中间产生弯曲变形。

(4) 内应力的影响。工件经过锻造、切削加工或淬火等引起的内应力将使丝杠产生弯曲变形。

(5) 离心力的影响。弯曲变形的轴存在质量偏心，在高速旋转时将产生离心力，进一步加剧了变形，并产生振动，以致不能继续进行加工。

细长轴很长，在一次进给过程中，由于刀具的逐渐磨损，使工件产生形状误差。针对上述特点，必须采取下列措施。

1) 机械加工方面的措施

(1) 合理选择车刀角度。粗车外圆时，采用前角 γ_0 =15°～20°，主偏角 k_r =75°～90°，这样可以减少切削力(特别是背向切削力)、切削热并防止丝杠弯曲变形。

(2) 车外圆时采用跟刀架作辅助支承，以提高工件刚性。跟刀架固定在床鞍上，跟着车刀一起移动，使用时先在工件一端车出一段外圆，然后调节跟刀架上两支承块，以适当的压力贴住工件已车好的部分，一般粗车时跟刀架装在刀尖的后面，如图 8.5(a)所示，精车时跟刀架装在刀尖的前面已粗车过的表面上，可避免划伤精车的表面，如图 8.5(b)所示。

必须注意：如果支承块的压力调节过大，工件便压向车刀，背吃刀量增大，结果车出直径变小。如果跟刀架位于刀尖之后，当支承块移到小直径处，支承块与工件脱离，此时切削力又使工件向后位移，结果背吃刀量减小，车出的轴径又增大；以后跟刀架又移到大直径上，又将工件压向车刀，车出直径又会减小，这样循环变化，使工件车成“竹节”形(如图 8.6 所示)。如果支承块的压力调节过小，甚至没有与工件接触，则没有起到跟刀架的作用。

(a) 粗车时　　(b) 精车时

图 8.5　跟刀架安装法

(a) 因跟刀架初始压力过大，工作轴线偏向车刀而车出凹心让车刀产生鼓肚

(b) 因工件轴线偏离车刀而车出鼓肚，跟刀架的压力产生凹心

(c) 因跟刀架压力过大，工件轴线偏向车刀而车凹心，循环产生“竹节”形

(d) 因工件轴线偏离车刀而车出鼓肚，如此循环而形成“竹节”形

图 8.6　“竹节”形的形成示意

(3) 采用大进给反向车削法。如图 8.7 所示为细长轴的大进给反向车削法，此法的加工特点如下。

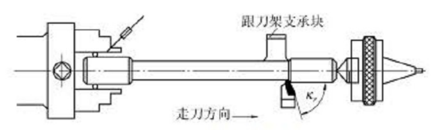


图 8.7　大进给反向车削法

① 机床卡盘的夹紧方式。卡盘对细长轴的夹紧方式有两种：一种是在轴端绕一圈钢丝，以减小卡爪对轴的接触面积，使工件在卡盘内能自由摆动，这样可使后顶尖与右端中心孔容易对正，接触良好，避免引起装夹弯曲变形。另一种方法是在卡盘一端车出一段缩颈

$d=D/2$(如图 8.8 所示)，以增加工件的柔性，也能起到如上所述的作用。

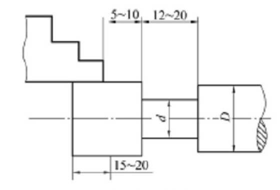


图 8.8　缩颈法

② 尾座上采用弹性顶尖。当工件受到切削热而伸长时，尾顶尖的弹簧能压缩，使工件能自由伸长，可避免弯曲变形。

③ 采用改良结构的跟刀架。跟刀架有 3 个支承点，可以增加支承刚性。

④ 进给方向由卡盘一端指向尾座，在轴向切削进给力作用下，使工件从卡盘到切削点之间一段受到拉伸，刀尖到尾顶尖一段，由于采用弹性顶尖，虽受压也不会将工件压弯。

⑤ 采用大进给量和大主偏角车刀。由于轴向切削进给力的加大，使工件在强有力的拉伸作用下。能减小径向颤振，使切削平稳，有利于粗糙度值变小。

(4) 合理选用纠正丝杠弯曲变形的方法。细长丝杠在加工过程中不可避免会产生弯曲变形，通常采取下面两种措施进行纠正。

① 冷校直。此法设备简单，操作方便，只要将工件两端搁在 V 形块上，中间用压机进行加压校直。校直后的丝杠，切除变形所需的加工余量可以减少，有利于提高生产率。但经冷校直的工件内部会产生内应力，必须在粗加工后进行低温时效，以消除内应力，保持丝杠精度稳定性。由于此法要带来内应力，所以仅适用于普通精度丝杠，对于高精度丝杠不宜采用。

② 加大丝杠的毛坯余量，反复切除工件的弯曲变形，并反复进行去除应力的时效处理。

由于半精加工和精加工的工序余量逐步减少，切削力、切削热和材料的塑性变形也逐步减少，因此加工引起的内应力也随之减少，最终加工产生的内应力所引起的变形量已小到不会超出工件的允差。这样可以保持丝杠的精度稳定性，故此法适用于精密丝杠。

(5) 合理选择切削用量和工序余量。过大的切削用量会使切削力、切削热加大，刀具容易磨损，致使丝杠的变形量和粗糙度值增大。工序余量太小，不足以切除前道工序所产生的弯曲变形，过大则进给次数增多，变形增大。

(6) 充分使用切削液。润滑冷却好，则切削力、切削热小，刀具不易磨损，可减小工件的形状误差。

2) 合理存放丝杠

丝杠属细长轴，容易产生弯曲变形，因此在存放丝杠时一般应采用垂直吊挂。另外丝杠加工完后装夹在车床上的时间也不宜太长。

3. 典型丝杠加工工艺过程

图 8.9 为卧式车床母丝杠零件简图，这种丝杠材料为 Y40Mn 易削钢，不需要淬火，精度为 8 级，表 8-4 为卧式车床母丝杠的工艺过程。

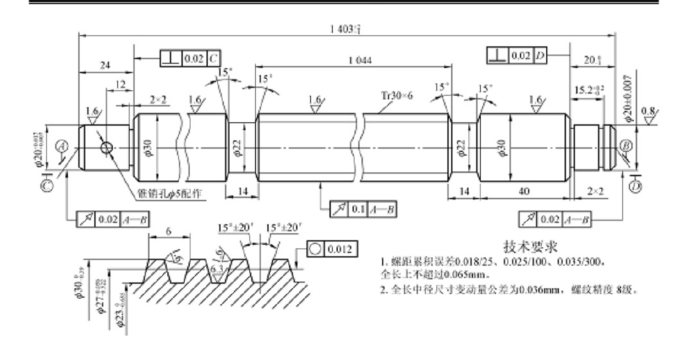


图 8.9　卧式车床母丝杠零件简图

表 8-4　卧式车床母丝杠的工艺过程

工序号	工序内容	定位基准面
1	下料	
2	正火、校直(径向圆跳动≤1.5mm)	
3	车端面、钻中心孔	外圆表面
4	粗车两端及外圆	双中心孔
5	校直(径向圆跳动≤0.6mm)	
6	高温时效(径向圆跳动≤1mm)	
7	重钻中心孔取全长	外圆表面
8	半精车两端及外圆	双中心孔
9	校直(径向圆跳动≤0.2mm)	
10	无心粗磨外圆	外圆表面
11	旋风车螺纹	双中心孔
12	校直、低温时效(t=170℃，12h)(径向圆跳动≤0.6mm)	
13	无心精磨外圆	外圆表面
14	修研中心孔	
15	车两端轴颈(车前在车床上检查性校直)	双中心孔
16	精车螺纹至图样尺寸(车后在车床上检查校直)	双中心孔

8.2　箱体类零件加工

8.2.1　箱体类零件概述

1. 箱体类零件的功用与结构特点

箱体类零件是机器或部件的基础零件，它将机器或部件中的轴、套、齿轮等有关零件

组装成一个整体，使它们之间保持正确的相互位置，并按照一定的传动关系协调地传递运动或动力。因此，箱体的加工质量将直接影响机器或部件的精度、性能和使用寿命。

常见的箱体类零件有机床主轴箱、机床进给箱、变速箱体、减速箱体、发动机缸体和机座等。根据箱体零件的结构形式不同，可分为整体式箱体和分离式箱体两大类。前者是整体铸造、整体加工，加工较困难，但装配精度高；后者可分别制造，便于加工和装配，但增加了装配工作量。

箱体的结构形式虽然多种多样，但仍有共同的主要特点：形状复杂、壁薄且不均匀、内部呈腔形、加工部位多、加工难度大，既有精度要求较高的孔系和平面，也有许多精度要求较低的紧固孔。因此，一般中型机床制造厂用于箱体类零件的机械加工工时约占整个产品加工量的 15%~20%。

2. 箱体类零件的主要技术要求

箱体类零件中以机床主轴箱的精度要求最高。以如图 8.10 所示的某车床主轴箱为例，箱体零件的技术要求可归纳如下。

1) 孔径精度

孔径的尺寸误差和几何形状误差会造成轴承与孔的配合不良。孔径过大，配合过松，使主轴回转轴线不稳定，并降低了支承刚度，易产生振动和噪声；孔径太小，会使配合偏紧，轴承将因外环变形，不能正常运转而缩短寿命。装轴承的孔不圆，也会使轴承外环变形而引起主轴径向圆跳动。

主轴孔的尺寸公差等级为 IT6，其余孔为 IT8~IT7。孔的几何形状精度未作规定的，一般控制在尺寸公差的 1/2 范围内即可。

2) 孔与孔的位置精度

同一轴线上各孔的同轴度误差和孔端面对轴线的垂直度误差，会使轴和轴承装配到箱体内出现歪斜，从而造成主轴径向圆跳动和轴向窜动，也加剧了轴承磨损。孔系之间的平行度误差，会影响齿轮的啮合质量。一般孔距允差为±0.025~±0.060mm，而同一中心线上的支承孔的同轴度约为最小孔尺寸公差的 1/2。

3) 孔和平面的位置精度

主要孔对主轴箱安装基面的平行度，决定了主轴与床身导轨的相互位置关系。这项精度是在总装时通过刮研来达到的。为了减少刮研工作量，一般规定在垂直和水平两个方向上，只允许主轴前端向上和向前偏。

4) 主要平面的精度

装配基面的平面度影响主轴箱与床身连接时的接触刚度，加工过程中作为定位基面则会影响主要孔的加工精度。因此规定了底面和导向面必须平直，为了保证箱盖的密封性，防止工作时润滑油泄出，还规定了顶面的平面度要求，当大批量生产将其顶面作为定位基面时，对它的平面度要求还要提高。一般箱体主要平面的平面度在 0.1~0.03mm，各主要平面对装配基准面垂直度为 0.1/300。

5) 表面粗糙度

一般主轴孔的表面粗糙度 *Ra* 为 0.4μm，其他各纵向孔的表面粗糙度 *Ra* 为 1.6μm；孔的内端面的表面粗糙度 *Ra* 为 3.2μm，装配基准面和定位基准面的表面粗糙度 *Ra* 为 2.5~0.63μm，其他平面的表面粗糙度 *Ra* 为 10~2.5μm。

3．箱体类零件的材料及毛坯

箱体类零件的材料常选用 HT200～400 的各种牌号的灰铸铁，而最常用的为 HT200。灰铸铁具有较好的耐磨性、铸造性和可切削性，而且吸振性好，成本又低。某些负荷较大的箱体采用铸钢件。也有某些简易箱体为了缩短毛坯制造的周期而采用钢板焊接结构的。精度要求较高的坐标镗床主轴箱则选用耐磨铸铁。负荷大的主轴箱也可采用铸钢件。在特定条件下，可采用铝镁合金或其他铝合金材料。

毛坯铸造时，应防止砂眼和气孔的产生。为了减少毛坯制造时产生残余应力，应使箱体壁厚尽量均匀，箱体浇铸后应安排退火工序。毛坯的加工余量与生产批量、毛坯尺寸、结构、精度和铸造方法等因素有关。具体数值可从有关手册中查到。

4．箱体类零件的时效处理

箱体类零件一般结构都比较复杂，壁厚不匀，铸造时会形成较大的内应力。为了保证其加工后精度的稳定性，在毛坯铸造之后需安排一次人工时效，以消除其内应力。通常，对普通精度箱体，一般在毛坯铸造之后安排一次人工时效即可，而对一些高精度箱体或形状特别复杂的箱体，应在粗加工之后再安排一次人工时效处理，以消除粗加工所造成的内应力，进一步提高箱体加工精度的稳定性。箱体人工时效的方法，除常用的加热保温的方法外，还可采用振动时效。

8.2.2 拟定箱体类零件机械加工工艺规程的原则

在拟定箱体类零件机械加工工艺规程时，有一些基本原则应该遵循。

1．先面后孔

先加工平面，后加工孔是箱体加工的一般规律。平面面积大，用其定位稳定可靠；支承孔大多分布在箱体外壁平面上，先加工外壁平面可切去铸件表面的凹凸不平及夹砂等缺陷，这样可减少钻头引偏，防止刀具崩刃等，对孔加工有利。

2．粗精分开、先粗后精

箱体的结构形状复杂，主要平面及孔系加工精度高，一般应将粗、精加工工序分阶段进行，先进行粗加工，后进行精加工。

3．基准的选择

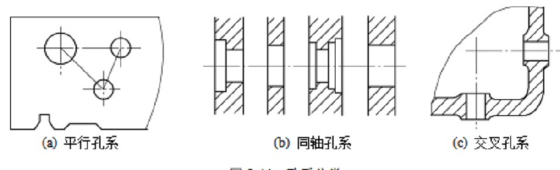
箱体零件的粗基准一般都用它上面的重要孔和另一个相距较远的孔作粗基准，以保证孔加工时余量均匀。精基准选择一般采用基准统一的方案，常以箱体零件的装配基准或专门加工的一面两孔为定位基准，使整个加工工艺过程基准统一，夹具结构类似，基准不重合误差降至最小甚至为零。

4．工序集中、先主后次

箱体零件上相互位置要求较高的孔系和平面，一般尽量集中在同一工序中加工，以保证其相互位置要求和减少装夹次数。紧固螺纹孔、油孔等次要工序，一般安排在平面和支承孔等主要加工表面精加工之后再进行加工。

8.2.3　孔系加工

箱体上若干个有相互位置精度要求的孔的组合，称为孔系。孔系可分为平行孔系、同轴孔系和交叉孔系(如图 8.11 所示)。孔系加工是箱体加工的关键，根据箱体加工批量的不同和孔系精度要求的不同，孔系加工所用的方法也是不同的。



(a) 平行孔系　　(b) 同轴孔系　　(c) 交叉孔系

图 8.11　孔系分类

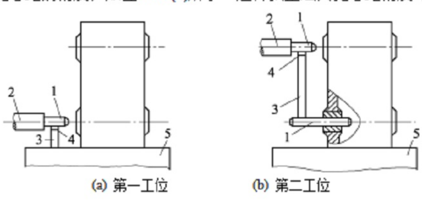
1. 平行孔系的加工

这里主要介绍如何保证平行孔系孔距精度的方法。

1) 找正法

找正法是在通用机床(镗床、铣床)上利用辅助工具来找正所要加工孔的正确位置的加工方法。这种找正法加工效率低，一般只适于单件小批生产。找正时除根据划线用试镗方法外，有时借用心轴量块或用样板找正，以提高找正精度。

图 8.12 所示为心轴和块规找正法。镗第一排孔时将心轴插入主轴孔内(或直接利用镗床主轴)，然后根据孔和定位基准的距离组合一定尺寸的块规来校正主轴位置，校正时用塞尺测定块与心轴之间的间隙，以避免块规与心轴直接接触而损伤块规，如图 8.12(a)所示。镗第二排孔时，分别在机床主轴和已加工孔中插入心轴，采用同样的方法来校正主轴轴线的位置，以保证孔心距的精度，如图 8.12(b)所示。这种找正法其孔心距精度可达±0.03mm。



(a) 第一工位　　(b) 第二工位

图 8.12　用心轴和块规找正

1—心轴　2—镗床主轴　3—块规　4—塞尺　5—镗床工作台

图 8.13 所示为样板找正法，用 10～20mm 厚的钢板制成样板 1，装在垂直于各孔的端面上(或固定于机床工作台上)，样板上的孔距精度较箱体孔系的孔距精度高(一般±0.01～±0.03mm)，样板上的孔径较工件的孔径大，以便于镗杆通过。样板上的孔径要求不高，但要

有较高的形状精度和较小的表面粗糙度值，当样板准确地装到工件上后，在机床主轴上装一个千分表 2，按样板找正机床主轴，找正后，即换上镗刀加工。此法加工孔系不易出差错，找正方便，孔距精度可达±0.05mm。这种样板的成本低，仅为镗模成本的1/7～1/9，单件小批生产中大型的箱体加工可用此法。

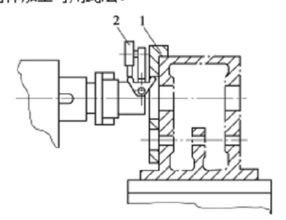


图 8.13　样板找正法

1—样板　2—千分表

2) 镗模法

在成批生产中，广泛采用镗模加工孔系，如图 8.14 所示。工件 5 装夹在镗模上，镗杆 4 被支承在镗模的导套 6 里，导套的位置决定了镗杆的位置，装在镗杆上的镗刀 3 将工件上相应的孔加工出来。当用两个或两个以上的支承 1来引导镗杆时，镗杆与机床主轴 2必须浮动联接。当采用浮动联接时，机床精度对孔系加工精度影响很小，因而可以在精度较低的机床上加工出精度较高的孔系。孔距精度主要取决于镗模，一般可达±0.05mm。能加工公差等级 IT7 的孔，其表面粗糙度 *Ra* 为 5～1.25μm 。当从一端加工、镗杆两端均有导向支承时，孔与孔之间的同轴度和平行度可达 0.02～0.03mm；当分别由两端加工时，可达 0.04～0.05mm。

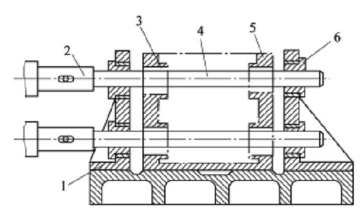


图 8.14　用镗模加工孔系

1—镗架支承　2—镗床主轴　3—镗刀　4—镗杆　5—工件　6—导套

用镗模法加工孔系，既可在通用机床上加工，也可在专用机床上或组合机床上加工。

3) 坐标法

坐标法镗孔是在普通卧式镗床、坐标镗床或数控镗铣床等设备上，借助于精密测量装置，

调整机床主轴与工件间在水平和垂直方向的相对位置，来保证孔心距精度的一种镗孔方法。

采用坐标法加工孔系时，要特别注意选择基准孔和镗孔顺序，否则，坐标尺寸累积误差会影响孔距精度。基准孔应尽量选择本身尺寸精度高、表面粗糙度值小的孔(一般为主轴孔)，这样在加工过程中，便于校验其坐标尺寸。孔心距精度要求较高的两孔应连在一起加工。加工时，应尽量使工作台朝同一方向移动，因为工作台多次往复，其间隙会产生误差，影响坐标精度。

现在国内外许多机床厂，已经直接用坐标镗床或加工中心机床来加工一般机床箱体。这样就可以缩短生产周期，适应机械行业多品种小批量生产的需要。

2．同轴孔系的加工

成批生产中，箱体上同轴孔的同轴度几乎都由镗模来保证。单件小批生产中，其同轴度用下面几种方法来保证。

1) 利用已加工孔作支承导向

如图8.15所示，当箱体前壁上的孔加工好后，在孔内装一导向套，以支承和引导镗杆加工后壁上的孔，从而保证两孔的同轴度要求。这种方法只适于加工箱壁较近的孔。

2) 利用镗床后立柱上的导向套支承导向

这种方法其镗杆两端支承，刚性好。但此法调整麻烦，镗杆要长，很笨重，故只适于单件小批生产中大型箱体的加工。

3) 采用调头镗

当箱体箱壁相距较远时，可采用调头镗。工件在一次装夹下，镗好一端孔后，将镗床工作台回转180°，调整工作台位置，使已加工孔与镗床主轴同轴，然后再加工另一端孔。

当箱体上有一较长并与所镗孔轴线有平行度要求的平面时，镗孔前应先用装在镗杆上的百分表对此平面进行校正，如图8.16(a)所示，使其和镗杆轴线平行，校正后加工孔 B，孔 B 加工后，回转工作台，并用镗杆上装的百分表沿此平面重新校正，这样就可保证工作台准确回转180°，如图8.16(b)所示。然后再加工孔 A，从而保证孔 A、B 同轴。

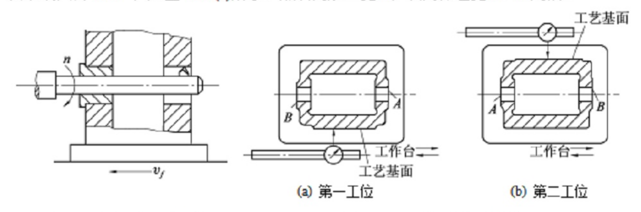


图8.15　利用已加工孔导向　　　　图8.16　调头镗孔时工件的校正

8.2.4　箱体类零件的加工工艺过程

1．中小批量生产中箱体的传统加工工艺过程

表8-5为图8.10所示某车床主轴箱中小批生产时的加工工艺过程。

中、小批量箱体加工，大多采用通用设备、专用夹具组织生产，必要时增添专用设备，其工艺过程特点如下。

表 8-5 某主轴箱加工工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	铸造	
2	时效	
3	漆底漆	
4	划线(主轴孔应留有加工余量，并应尽量均匀)，划面 *C*、*G* 及面 *E*、*D* 加工线	
5	粗、精加工顶面 *G*	按线找正
6	粗、精加工面 *B*、*C* 及侧面 *D*	顶面 *G* 并校正主轴线
7	粗、精加工两端面 *E*、*F*	面 *B*、*C*
8	粗、半精加工各纵向孔	面 *B*、*C*
9	精加工各纵向孔	面 *B*、*C*
10	粗、精加工横向孔	面 *B*、*C*
11	加工螺孔及各次要孔	
12	清洗、去毛刺	
13	检验	

1) 粗精分开

粗精分开，先粗后精这条原则对所有情况都是适用的。但中、小批量箱体零件加工如果从工序上全部安排粗、精分开，则机床、夹具数量要增加，工件转运也费时费力，所以实际生产中并不都这样做。不少情况下是将粗、精加工放在一道工序内完成。但是从工步上讲，粗、精还是分开的，如粗加工后将工件松开一点，然后再用较小的夹紧力夹紧工件，使工件因夹紧力而产生的弹性变形在精加工时得以消除。龙门刨床刨削主轴箱基准面时，粗刨后将工件放松一点，然后再精刨基准面就是这个道理。又如导轨磨床磨主轴箱基准面时，粗磨后进行充分冷却，然后再进行精磨。

2) 粗基准的选择

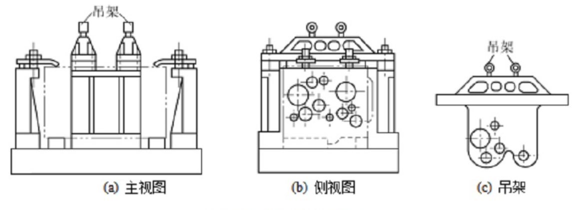
一般来说，中、小批生产箱体类零件仍然选择重要孔(如主轴孔)为粗基准，但实现以主轴孔为粗基准时大多采用划线装夹的方式。划线过程大体上是：先划出主轴孔，其次划出距主轴孔较远的另一孔位置，然后划出其他各孔各平面。加工箱体平面时，按线找正并装夹工件，就是以主轴孔为粗基准。

3) 精基准的选择

中、小批生产时箱体零件多用装配基准作精基准来加工孔系。加工图 8.10 所示主轴箱孔系时，选择箱体底面 *B*、*C* 作为定位基准，面 *B*、*C* 既是主轴箱的装配基准，又是主轴孔的设计基准，并与箱体的端面、侧面以及各主要纵向孔在相互位置上有着直接的关系，故选择面 *B*、*C* 做定位基准，不仅消除了主轴孔加工时的基准不重合误差，而且，用面 *B*、*C* 定位稳定可靠，装夹误差小，加工各孔时，由于箱口朝上，所以更换导向套、安装调整刀具、测量孔径尺寸、观察加工情况等都很方便。

这种定位方式也有它的不足之处。加工箱体中间壁上的孔时，为了提高刀具系统的刚

度，应当在箱体内部相应的部位设置刀杆的支承。由于箱体底部是封闭的，中间支承只能用如图 8.17 所示的吊架从箱体顶面的开口处伸入箱体内，每加工一件需装卸一次，吊架与镗模之间虽有定位销定位，但吊架刚性差，制造安装精度较低，经常装卸时也容易产生误差，且使加工的辅助时间增加，因此这种定位方式只适用于中小批生产的箱体零件加工。批量大时常采用顶面及两个销孔作定位基准，如图 8.18 所示。这种定位方式，中间导向支架可以紧固在夹具体上，提高了夹具刚度，工件装卸方便；但这种夹具不易观察各加工表面的情况且会出现基准不重合误差，同时增加了两个定位销孔的加工工序。



(a) 主视图　　(b) 侧视图　　(c) 吊架

图 8.17　吊架式镗模夹具

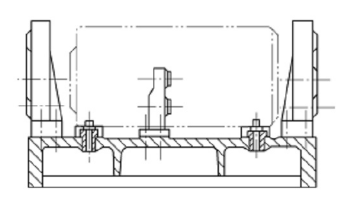


图 8.18　用箱体顶面及两个销孔定位的镗模

2. 中、小批量箱体生产中的高效自动化加工工艺

数控加工中心机床(简称加工中心)是一种具有自动换刀装置的复合型数控机床。由于有了自动换刀装置，它能将铣、镗、钻等多种加工功能有效地转换，从而可以集中许多工序对工件进行连续加工，这样可以大量节省装夹工件的时间和大大提高加工精度，因而特别适合于中、小批量箱体零件的加工。

用加工中心加工箱体时，在加工前按照工件图样和工艺要求把加工的所有信息，如工件和刀具间的相对运动轨迹、加工顺序、切削用量以及为了实现加工所必须的其他辅助动作等，用代码编制出程序，然后输入到数控系统中去，加工中心按照指令自动进行加工。

加工中心具有较高的坐标位移精度和工作台回转精度，完全可以直接由机床保证箱体孔系及端面的加工精度要求。

3. 箱体零件加工自动线

大量生产中，广泛采用组合机床与输送装置组成的自动线进行箱体零件加工。所有的加工和工件的输送等辅助动作，都无需工人直接操作，整个过程按照一定的生产节拍自动地、顺序地进行，如图 8.19 所示。它不仅大大提高了劳动生产率，降低了成本和减轻了工人的劳动强度，而且能稳定地保证工件的加工质量，对操作工人的技术水平要求也较低。我国目前在汽车、柴油机、拖拉机等行业中，都广泛地采用自动线来加工箱体。

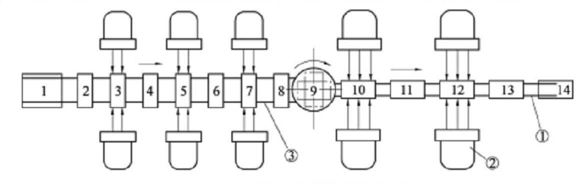


图 8.19　组合机床自动线加工箱体示意

1，14—自动线输送带的传动装置　2—装料工位　3，5，7，10，12—加工工位
4，6，8，11—中间工位　9—翻转　13—卸料工位　①，③—输送带　②—动力头

4. 分离式齿轮箱体加工工艺过程及其分析

一般减速箱，为了制造与装配的方便，常做成可分离的，如图 8.20 所示。

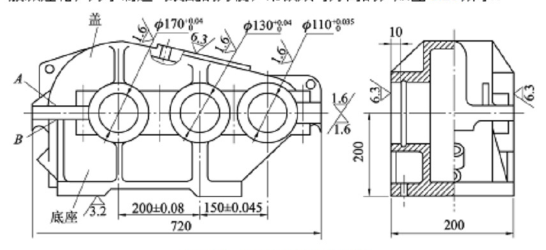


图 8.20　分离式齿轮箱体结构

1) 分离式箱体的主要技术要求

(1) 对合面对底座的平行度误差不超过 0.5/1000。

(2) 对合面的表面粗糙度 Ra 小于 1.6μm，两对合面的接合间隙不超过 0.03mm。

(3) 轴承支承孔必须在对合面上，误差不超过±0.2mm。

(4) 轴承支承孔的尺寸公差为 H7，表面粗糙度值小于 Ra1.6μm，圆柱度误差不超过孔径公差的一半，孔距精度误差为±0.05～±0.08mm。

2) 分离式箱体的工艺特点

分离式箱体的工艺过程见表 8-6、表 8-7、表 8-8。

表 8-6　箱盖的工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	铸造	
2	时效	
3	涂底漆	
4	粗刨对合面	凸缘 *A* 面
5	刨顶面	对合面
6	磨对合面	顶面
7	钻结合面连接孔	对合面、凸缘轮廓
8	钻顶面螺纹底孔、攻螺纹	对合面二孔
9	检验	

表 8-7　底座的工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	铸造	
2	时效	
3	涂底漆	
4	粗刨对合面	凸缘 *B* 面
5	刨底面	对合面
6	钻底面 4 孔、锪沉孔、铰两个工艺孔	对合面、端面、侧面
7	钻侧面测油孔、放油孔、螺纹底孔、锪沉孔、攻螺纹	底面、二孔
8	磨对合面	底面
9	检验	

表 8-8　箱体合装后的工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	将盖与底座对准合拢夹紧、配钻、铰二定位销孔，打入锥销，根据盖配钻底座结合面的连接孔，锪沉孔	
2	拆开盖与底座，修毛刺、重新装配箱体，打入锥销，拧紧螺栓	
3	铣两端面	底面及两孔
4	粗镗主轴支承孔，割孔内槽	底面及两孔
5	精镗主轴支承孔，割孔内槽	底面及两孔
6	去毛刺、清洗、打标记	
7	检验	

由以上各表可见，分离式箱体虽然遵循一般箱体的加工原则，但是由于结构上的可分离性，在工艺路线的拟定和定位基准的选择方面均有一些特点。

(1) 加工路线。分离式箱体工艺路线与整体式箱体工艺路线的主要区别在于整个加工过程分为两个大的阶段：第一阶段先对箱盖和底座分别进行加工，主要完成对合面及其他平面，紧固孔和定位孔的加工，为箱体的合装作准备；第二阶段在合装好的箱体上加工孔及其端面。在两个阶段之间安排钳工工序，将箱盖和底座合装成箱体，并用两销定位，使

其保持一定的位置关系，以保证轴承孔的加工精度和拆装后的重复精度。

(2) 定位基准。

① 粗基准的选择。分离式箱体最先加工的是箱盖和箱座的对合面。分离式箱体一般不能以轴承孔的毛坯面作为粗基准，而是以凸缘不加工面作为粗基准，即箱盖以凸缘 *A* 面，底座以凸缘 *B* 面为粗基准。这样可以保证对合面凸缘厚薄均匀，减少箱体合装时对合面的变形。

② 精基准的选择。分离式箱体的对合面与底面(装配基面)有一定的尺寸精度和相互位置精度要求；轴承孔轴线应在对合面上，与底面也有一定的尺寸精度和相互位置精度要求。为了保证以上几项要求，加工底座的对合面时，应以底面为精基准，使对合面加工时的定位基准与设计基准重合。箱体合装后加工轴承孔时，仍以底面为主要定位基准，并与底面上的两定位孔组成典型的“一面两孔”定位方式。这样，轴承孔的加工，其定位基准既符合“基准统一”原则，也符合“基准重合”原则，有利于保证轴承孔轴线与对合面的重合度及与装配基面的尺寸精度和平行度。

8.3　圆柱齿轮加工

8.3.1　概述

1. 圆柱齿轮的功用与结构特点

圆柱齿轮是机械传动中应用最广泛的零件之一，其功用是按规定的速比传递运动和动力。

圆柱齿轮的结构由于使用要求不同而具有各种不同的形状，但从工艺角度可将齿轮看成是由齿圈和轮体两部分构成。按照齿圈上轮齿的分布形式，可分为直齿、斜齿、人字齿等；按照轮体的结构特点，齿轮大致分为盘形齿轮、套筒齿轮、内齿轮、轴齿轮、扇形齿轮和齿条等，如图 8.21 所示。

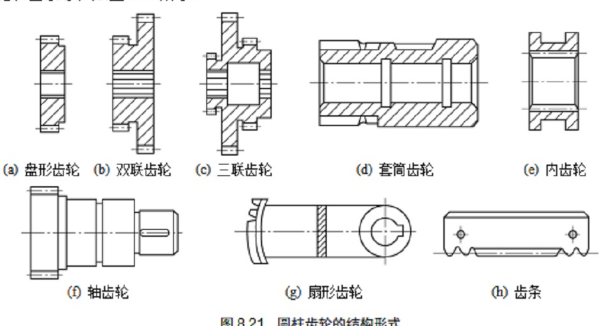


图 8.21　圆柱齿轮的结构形式

在上述各种齿轮中，以盘形齿轮应用最广。盘形齿轮的内孔多为精度较高的圆柱孔和花键孔。其轮缘具有一个或几个齿圈。单齿圈齿轮的结构工艺性最好，可采用任何一种齿形加工方法加工轮齿；而双联或三联的小齿圈往往会受到台肩的影响，限制了某些加工方法的使用，一般只能采用插齿。如果小齿圈精度要求高，需要精滚或磨齿加工，而轴向距离在设计上又不允许加大时，可将此多齿圈齿轮做成单齿圈齿轮的组合结构，以改善加工的工艺性。

2. 齿轮的主要技术要求

1) 齿轮的传动精度要求

齿轮本身的制造精度，对整个机器的工作性能、承载能力及使用寿命都有很大的影响。根据其使用条件，齿轮传动应满足以下几个方面的要求。

(1) 传递运动准确性。

要求齿轮较准确地传递运动，传动比恒定。即要求齿轮在一转中的转角误差不超过一定范围。

(2) 传递运动平稳性。

要求齿轮传递运动平稳，以减小冲击、振动和噪声。即要求限制齿轮转动时瞬时速比的变化。

(3) 载荷分布均匀性。

要求齿轮工作时，齿面接触要均匀，以使齿轮在传递动力时不致因载荷分布不匀而使接触应力过大，引起齿面过早磨损。接触精度除了包括齿面接触均匀性以外，还包括接触面积和接触位置。

(4) 传动侧隙的合理性。

要求齿轮工作时，非工作齿面间留有一定的间隙，以储存润滑油，补偿因温度、弹性变形所引起的尺寸变化和加工、装配时的一些误差。

齿轮的制造精度和齿侧间隙主要根据齿轮的用途和工作条件而定。对于分度传动用的齿轮，主要要求齿轮的运动精度较高；对于高速动力传动用齿轮，为了减少冲击和噪声，对工作平稳性精度有较高要求；对于重载低速传动用的齿轮，则要求齿面有较高的接触精度，以保证齿轮不致过早磨损；对于换向传动和读数机构用的齿轮，则应严格控制齿侧间隙，必要时须消除间隙。

2) 齿坯的主要技术要求

齿坯的内孔(或轴颈)、端面(有时还有顶圆)常被用作齿轮加工、检验和安装的基准，所以齿坯加工精度对齿轮加工和传动的精度均有较大的影响。

齿坯主要技术要求包括基准孔(或轴)的直径公差和基准端面的端面跳动。标准规定了对应于不同齿轮精度等级的齿坯公差等级和公差值。

3. 齿轮的材料、热处理和毛坯

1) 齿轮的材料与热处理

(1) 材料的选择。齿轮应按照使用时的工作条件选用合适的材料。一般来说，对于低速重载的传力齿轮，齿面受压产生塑性变形和磨损，且轮齿易折断。应选用机械强度、硬

度等综合力学性能较好的材料，如 18CrMnTi；线速度高的传力齿轮，齿面容易产生疲劳点蚀，所以齿面应有较高的硬度，可用 38CrMoAlA 氮化钢；承受冲击载荷的传力齿轮，应选用韧性好的材料，如低碳合金钢 18CrMnTi；非传力齿轮可以选用不淬火钢、铸铁及夹布胶木、尼龙等非金属材料；一般用途的齿轮均用 45 钢等中碳结构钢和低碳结构钢如 20Cr、40Cr、20CrMnTi 等制成。

(2) 齿轮的热处理。齿轮加工中根据不同的目的，安排两类热处理工序。

第一类：毛坯热处理。在齿坯加工前后安排预备热处理(正火或调质)。其主要目的是消除锻造及粗加工所引起的残余应力，改善材料的切削性能和提高综合力学性能。

第二类：齿面热处理。齿形加工完毕后，为提高齿面的硬度和耐磨性，常进行渗碳淬火、高频淬火、碳氮共渗和氮化处理等热处理工序。

2) 齿轮毛坯

齿轮毛坯形式主要有棒料、锻件和铸件。棒料用于小尺寸、结构简单且对强度要求不太高的齿轮。当齿轮强度要求高，并要求耐磨损、耐冲击时，多用锻件毛坯。当齿轮的直径大于 ϕ400～ϕ600mm 时，常用铸造齿坯。为了减少机械加工量，对大尺寸、低精度的齿轮，可以直接铸出轮齿；对于小尺寸、形状复杂的齿轮，可以采用精密铸造、压力铸造、精密锻造、粉末冶金、热轧和冷挤等新工艺制造出具有轮齿的齿坯，以提高劳动生产率，节约原材料。

8.3.2 齿轮类零件的工艺分析

齿轮加工的工艺过程根据齿轮材质和热处理要求、齿轮结构及尺寸大小、精度要求、生产批量和车间设备条件而定，一般可以归纳成如图 8.22 所示的基本工艺过程。

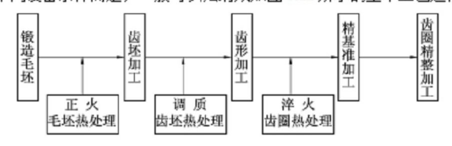


图 8.22 齿轮的基本工艺过程

1. 齿坯加工

齿形加工之前的齿轮加工称为齿坯加工，齿坯的内孔(或轴颈)、端面或外圆经常是齿轮加工、测量和装配的基准，齿坯的精度对齿轮的加工精度有着重要的影响。因此，齿坯加工在整个齿轮加工中占有重要的地位。

1) 齿坯加工精度

齿坯加工中，主要要求保证的是基准孔(或轴颈)的尺寸精度和形状精度、基准端面相对于基准孔(或轴颈)的位置精度。不同精度的孔(或轴颈)的齿坯公差以及位置精度分别见表 8-9 和表 8-10。

表 8-9 齿坯尺寸和形状公差

齿轮精度等级	5	6	7	8
孔的尺寸和形状公差	IT5	IT6	IT7	
轴的尺寸和形状公差	IT5		IT6	
顶圆直径	IT7	IT8		

表 8-10 齿坯基准面径向和端面跳动公差(μm)

分度圆直径/mm	公差等级	
	IT6 和 IT5	IT6 和 IT5
<125	11	18
125～400	14	22
400～800	20	32

2) 齿坯加工方案

齿坯加工方案的选择主要与齿轮的轮体结构、技术要求和生产批量等因素有关。对轴、套筒类齿轮的齿坯，其加工工艺与一般轴、套筒类零件的加工工艺相同。下面主要对盘状齿轮的齿坯加工方案作一介绍。

(1) 中、小批生产的齿坯加工。中小批生产尽量采用通用机床加工。对于圆柱孔齿坯，可采用粗车—精车的加工方案。

① 在卧式车床上粗车齿轮各部分。

② 在一次安装中精车内孔和基准端面，以保证基准端面对内孔的跳动要求。

③ 以内孔在心轴上定位，精车外圆、端面及其他部分。

对于花键孔齿坯，采用粗车—拉—精车的加工方案。

(2) 大批量生产的齿坯加工。大批量生产中，无论花键孔或圆柱孔，均采用高生产率的机床(如拉床、多轴自动或多刀半自动车床等)，其加工方案如下。

① 以外圆定位加工端面和孔(留拉削余量)。

② 以端面支承拉孔。

③ 以孔在心轴上定位，在多刀半自动车床上粗车外圆、端面和切槽。

④ 不卸下心轴，在另一台车床上继续精车外圆、端面、切槽和倒角。

2. 齿形加工方案选择

1) 定位基准选择

为保证齿轮的加工质量，齿形加工时应根据“基准重合”原则，选择齿轮的装配基准和测量基准为定位基准，而且尽可能在整个加工过程中保持基准的统一。

对于带孔齿轮，一般选择内孔和一个端面定位，基准端面相对内孔的端面跳动应符合标准规定。当批量较小不采用专用心轴以内孔定位时，也可选择外圆作找正基准，但外圆相对内孔的径向跳动应有严格的要求。

对于直径较小的轴类齿轮，一般选择中心孔定位，但对于直径或模数较大的轴类齿轮，由于自重和切削力较大，不宜再选择中心孔定位，而多选择轴颈和端面跳动较小的端面定位。

2) 齿形加工方案选择

一个齿轮的加工过程是由若干工序组成的。为了获得符合精度要求的齿轮，整个加工过程都是围绕着齿形加工工序服务的。齿形加工方法很多，按加工中有无切削，可分为无切削加工和有切削加工两大类。

无切削加工包括热轧齿轮、冷轧齿轮、精锻、粉末冶金等新工艺。无切削加工具有生产效率高，材料消耗少、成本低等一系列的优点，目前已推广使用。但因其加工精度较低，工艺不够稳定，特别是生产批量小时难以采用等缺点限制了它的应用。

有切削加工具有良好的加工精度，目前仍是齿形的主要加工方法，按其加工原理可分为成形法和展成法两种。

成形法的特点是所用刀具的切削刃形状与被切齿轮轮槽的形状相同。用成形原理加工齿形的方法有：用齿轮铣刀在铣床上铣齿、用成形砂轮磨齿、用齿轮拉刀拉齿等方法。这些方法由于存在分度误差及刀具的安装误差，所以加工精度较低，一般只能加工出 9~10 级精度的齿轮。此外，加工过程中需作多次不连续分齿，生产效率也很低。因此，主要用于单件小批量生产和修配工作中加工精度不高的齿轮。

展成法是应用齿轮啮合的原理来进行加工的，用这种方法加工出来的齿形轮廓是刀具切削刃运动轨迹的包络线。齿数不同的齿轮，只要模数和齿形角相同，都可以用同一把刀具来加工。用展成原理加工齿形的方法有滚齿、插齿、剃齿、珩齿和磨齿等方法。其中剃齿、珩齿和磨齿属于齿形的精加工方法。展成法的加工精度和生产效率都较高，刀具通用性好，所以在生产中的应用十分广泛。

齿形加工方案的选择，主要取决于齿轮的精度等级、结构形状、生产类型和齿轮的热处理方法及生产现场的条件。对于不同精度的齿轮，常用的齿形加工方案如下。

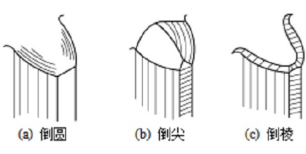
(1) 8 级精度以下齿轮。调质齿轮用滚齿或插齿应能满足要求。对于淬硬齿轮可采用滚(插)齿—齿端加工—淬火—校正孔的加工方案，但在淬火前齿形加工精度应提高一级。

(2) 6~7 级精度齿轮。对于淬硬齿面的齿轮可采用滚(插)齿—齿端加工—剃齿—表面淬火—校正基准—珩齿的加工方案。这种方案生产效率高，设备简单，成本较低，适用于成批或大批生产齿轮。

(3) 5 级以上精度的齿轮。一般采用粗滚齿—精滚齿—齿端加工—淬火—校正基准—粗磨齿—精磨齿的加工方案。磨齿是目前齿形加工中精度最高、表面粗糙度参数值最小的加工方法，最高精度可达 3~4 级。

3) 齿端加工

齿轮的齿端加工方式有倒圆、倒尖、倒棱和去毛刺，如图 8.23 所示。经倒圆、倒尖、倒棱后的齿轮，沿轴向移动时容易进入啮合。齿端倒圆应用最多。图 8.24 所示为用指状铣刀倒圆的原理图。



(a) 倒圆　(b) 倒尖　(c) 倒棱

图 8.23　齿端形状

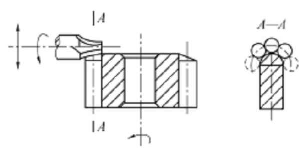


图 8.24　齿端倒圆

4) 精基准的修整

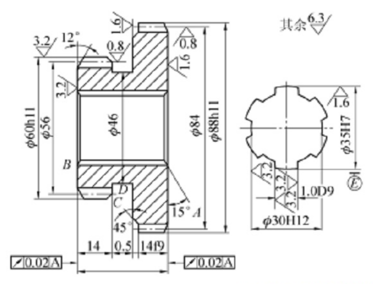
齿轮淬火后其孔常发生变形，孔直径可缩小 0.01～0.05mm。为保证齿形精加工质量，必须对基准孔予以修整。修整方法一般采用磨孔或推孔。对于成批或大批大量生产的未淬硬的外径定心的花键孔及圆柱孔齿轮，常采用推孔。推孔生产率高，并可用加长推刀前导引部分来保证推孔的精度。对于以小径定心的花键孔或已淬硬的齿轮，以磨孔为好，可稳定地保证精度。磨孔应以齿面定位，符合互为基准原则。

8.3.3　典型齿轮零件加工工艺过程

1．普通精度齿轮加工工艺分析

图 8.25 所示为一双联齿轮，材料为 40Cr，精度为 7 级，其加工工艺过程见表 8-11。从表中可见，齿轮加工工艺过程大致要经过如下几个阶段：毛坯热处理、齿坯加工、齿形加工、齿端加工、齿面热处理、精基准修正及齿形精加工等。

加工的第一阶段是齿坯最初进入机械加工的阶段。由于齿轮的传动精度主要决定于齿形精度和齿距分布均匀性，而这与切齿时采用的定位基准(孔和端面)的精度有着直接的关系，所以，这个阶段主要是为下一阶段加工齿形准备精基准，使齿的内孔和端面的精度基本达到规定的要求。在这个阶段中除了加工出基准外，对于齿形以外的次要表面的加工，也应尽量在这一阶段的后期加以完成。



齿号	I	II
模数	2	2
齿数	28	42
精度等级	7GK	7JL
公法线长度变动量	0.039	0.024
齿圈径向跳动	0.050	0.042
基节偏差	±0.016	±0.016
齿形公差	0.017	0.018
齿向公差	0.017	0.017
公法线平均长度	$21.36^{0}_{-0.05}$	$27.6^{0}_{-0.05}$
跨齿数	4	5

图 8.25　双联齿轮零件简图

表 8-11 双联齿轮加工工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	毛坯锻造	
2	正火	
3	粗车外圆及端面，留余量 1.5～2mm，钻镗花键底孔至尺寸 ϕ30H12	外圆及端面
4	拉花键孔	ϕ30H12 孔及 A 面
5	钳工去毛刺	
6	上心轴，精车外圆、端面及槽至要求	花键孔及 A 面
7	检验	
8	滚齿(z=42)，留剃余量 0.07～0.10mm	花键孔及 B 面
9	插齿(z=28)，留剃余量 0.04～0.06mm	花键孔及 A 面
10	倒角(Ⅰ、Ⅱ齿 12° 牙角)	花键孔及端面
11	钳工去毛刺	
12	剃齿(z=42)，公法线长度至尺寸上限	花键孔及 A 面
13	剃齿(z=28)，采用螺旋角度为 5° 的剃齿刀，剃齿后公法线长度至尺寸上限	花键孔及 A 面
14	齿部高频淬火：G2	
15	推孔	花键孔及 A 面
16	珩齿	花键孔及 A 面
17	总检入库	

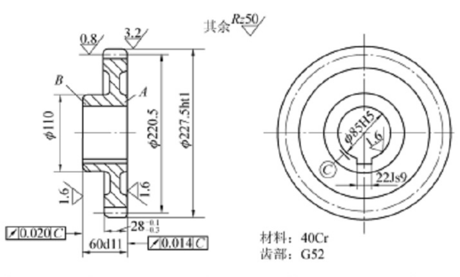
第二阶段是齿形的加工。对于不需要淬火的齿轮，一般来说这个阶段也就是齿轮的最后加工阶段，经过这个阶段就应当加工出完全符合图样要求的齿轮来。对于需要淬硬的齿轮，必须在这个阶段中加工出能满足齿形的最后精加工所要求的齿形精度，所以这个阶段的加工是保证齿轮加工精度的关键阶段，应予以特别注意。

第三阶段是热处理阶段。在这个阶段中主要对齿面进行淬火处理，使齿面达到规定的硬度要求。

最后阶段是齿形的精加工阶段。这个阶段的目的，在于修正齿轮经过淬火后所引起的齿形变形，进一步提高齿形精度和降低表面粗糙度，使之达到最终的精度要求。在这个阶段中首先应对定位基准面(孔和端面)进行修整，因淬火以后齿轮的内孔和端面均会产生变形，如果在淬火后直接采用这样的孔和端面作为基准进行齿形精加工，很难达到齿轮精度的要求。以修整过的基准面定位进行齿形精加工，可以使定位准确可靠，余量分布也比较均匀，以便达到精加工的目的。

2．高精度齿轮加工工艺及特点

图 8.26 所示为一高精度齿轮，材料为 40Cr，精度为 6-5-5 级，其工艺路线见表 8-12。



模数	3.5	基节累积误差	0.045	齿向公差	0.007
齿数	63	基节极限偏差	±0.006.5	公法线平均长度	70.13−8.05
精度等级	655KM	齿形公差	0.007	跨齿数	7

图 8.26　高精度齿轮简图

表 8-12　高精度齿轮加工工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	毛坯锻造	
2	正火	
3	粗车各部分，留余量 1.5～2mm	外圆及端面
4	精车各部分，内孔至 φ 84.8H7，总长留加工余量 0.2mm，其余至尺寸	外圆及端面
5	检验	
6	滚齿(齿厚留磨加工余量 0.10～0.15mm)	内孔及 *A* 面
7	倒角	内孔及 *A* 面
8	钳工去毛刺	
9	齿部高频淬火：G52	
10	插键槽	内孔(找正用)及 *A* 面
11	磨内孔至 φ 85H5	分度圆和 *A* 面(找正用)
12	靠磨大端 *A* 面	内孔
13	平面磨 *B* 面至总长度尺寸	A 面
14	磨齿	内孔及 *A* 面
15	总检入库	

本章小结

本章主要介绍了轴类、箱体类和圆柱齿轮类典型零件的加工。

阐述了轴类零件的作用及其主要技术参数。介绍了轴类零件材料的选择、毛坯形式的选择和热处理的安排。轴类零件加工的典型工艺路线为：毛坯及其热处理—预加工—车削外圆—铣键槽等—热处理—磨削。比较了轴类零件大批生产和小批生产的工艺过程。探讨了在主轴加工中涉及的几个工艺问题的处理。举了卧式车床主轴加工工艺过程的实例并进行了分析。介绍了丝杠的作用、技术要求、选材和热处理方式。对于丝杠类的细长轴，很容易产生弯曲变形，可从多方面采取措施来防止或减少变形。最后结合实例介绍了典型丝杠加工工艺过程。

以某车床主轴箱为例，分析了箱体类零件的技术要求。介绍了箱体类零件材料的选用及时效的安排。阐述了拟定箱体类零件机械加工工艺规程应该遵循的原则。鉴于孔系加工在箱体加工中的关键性，介绍了不同类别孔系加工所用的方法。结合实例介绍和对比了中小批量生产中箱体的传统加工工艺过程和中、小批量箱体生产中的高效自动化加工工艺。最后介绍了箱体零件加工自动线、分离式齿轮箱体加工工艺过程及其分析。

圆柱齿轮类零件中，对齿坯的主要技术要求包括基准孔（或轴）的直径公差和基准端面的端面跳动。介绍了齿轮材料的选用、热处理工序的安排和齿轮毛坯形式的选择。在齿轮类零件的工艺分析部分着重介绍了齿坯加工和齿形加工方案的选择。最后结合实例介绍了普通精度齿轮加工工艺分析和高精度齿轮加工工艺。

习　题

(1) 轴类零件的主要技术参数包括哪些内容？

(2) 空心类机床主轴的深孔加工何时加工为好？试说明理由。

(3) 在车床(或磨床)上加工相同尺寸及相同精度的内外圆柱表面时，加工内圆表面的走刀次数往往比外圆面多，试分析其原因。

(4) 顶尖孔在轴类零件加工中起什么作用？在什么情况下需进行顶尖孔的修研？顶尖孔的加工和研磨常用哪些方法？

(5) 试为某轴ϕ50h6外圆表面选择加工方案，加工条件如下。

生产类型：大批生产。
工件尺寸：全长560mm，最大直径ϕ75mm，最小直径ϕ40mm。
工件材料及热处理要求：40Cr，ϕ50h6表面要求淬硬HRC56。

(6) 箱体类零件的主要技术参数包括哪些内容？

(7) 拟定箱体类零件机械加工工艺规程的基本原则有哪些？

(8) 单件生产某些大型箱体时，往往有些工序合并在一道工序内完成，原因是什么？

(9) 保证箱体平行孔系孔距进度的方法有哪些？各适合哪些场合？

(10) 试为某箱体 ϕ160K6 孔选择加工方案，加工条件如下。

生产类型：成批生产。

工件外形尺寸：长×宽×高=690mm×520mm×355mm。

工件材料：HT300。

(11) 试介绍齿轮零件的基本工艺过程。

(12) 选择齿形加工方案的依据是什么？

(13) 试为某机床齿轮的齿形加工选择加工方案，加工条件如下。

生产类型：大批生产。

工件材料：45 钢，要求高频淬火 52HRC。

齿面加工要求：模数 m=2.25mm；齿数 z=56；精度等级为 7-7-6；表面粗糙度 Ra 为 0.8μm。

6×M10
0.05
3.2
G
E
F
6.3
3.2
φ30
φ30
φ24
40
75
665
120

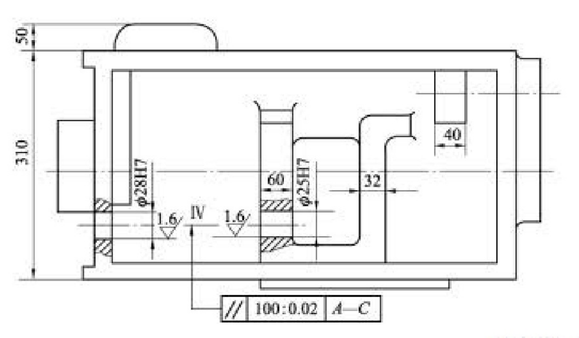
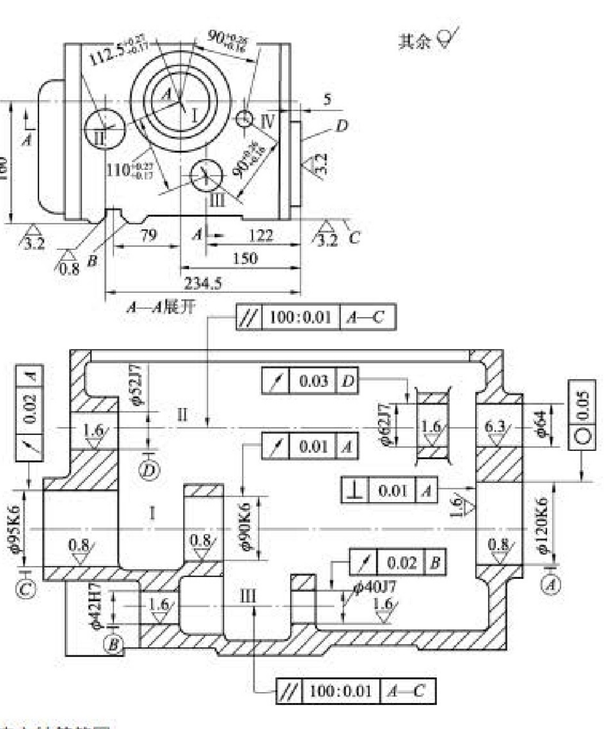


图 8.10　某车



其余
112.5
90
5
D
3.2
160
A
I
II
III
IV
110
C
0.8
B
79
122
150
234.5
A—A展开
100:0.01
A—C
0.03
0.01
0.02
0.05
φ52J7
φ62J7
φ64
φ95K6
φ90K6
φ120K6
φ42H7
φ40J7
1.6
6.3

床主轴箱简图